

**Yevgeniy Yeryomin**

**Multikriterielle Handoverentscheidung für moderne mobile heterogene  
Kommunikationsnetze**



Yevgeniy Yeryomin

**Multikriterielle Handoverentscheidung  
für moderne mobile heterogene  
Kommunikationsnetze**



Universitätsverlag Ilmenau

2018

# Impressum

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 22. Mai 2017

1. Gutachter/-in: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jochen Seitz  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter/-in: Prof. Dr.-Ing. Agnieszka Lewandowska  
(Duale Hochschule Gera-Eisenach)

3. Gutachter/-in: Prof. Dr. (JP) Patrick Mäder  
(Technische Universität Ilmenau)

Tag der Verteidigung: 25. Mai 2018

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

**ISBN** 978-3-86360-188-1 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000322

---

Titelfoto: [photocase.com](http://photocase.com) | AlexFlint

*„Ilmenau hat mir viel Zeit, Mühe und Geld gekostet, dafür habe ich aber auch etwas gelernt und mir eine Anschauung der Natur erworben, die ich um keinen Preis umtauschen möchte.“*

Johann Wolfgang von Goethe



## **Danksagung**

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand im Fachgebiet Kommunikationsnetze an der Technischen Universität Ilmenau. Im Laufe meiner Promotion habe ich nicht nur zahlreiche Höhen, sondern auch einige Tiefen erlebt. Dabei fand ich die nötige fachliche Unterstützung, Motivation und Kraft bei den Menschen, die mich in dieser Lebensphase begleitet haben. An dieser Stelle möchte ich mich bei diesen Menschen bedanken.

In erster Linie möchte ich meine Dankbarkeit an meinen wissenschaftlichen Betreuer Herrn Professor Dr. rer. nat. Jochen Seitz für seine fachliche Betreuung einschließlich seiner zahlreichen wertvollen Vorschläge und Anregungen, aber auch für seine unermessliche Geduld aussprechen.

Auch möchte ich mich bei meinen Kollegen aus dem Fachgebiet Kommunikationsnetze der Technischen Universität Ilmenau nicht nur für die kollegiale wissenschaftliche, sondern auch für die freundliche, familiäre Atmosphäre bedanken. Ein besonderer Dank gilt meinen Büronachbarn Herrn Dr. Maik Debes für manchen angenehmen und spannenden Gedankenaustausch und neue vielfältige Erkenntnisse durch unsere Gespräche, aber auch durch manche Schweigeperioden. Für die fruchtbare und spannende wissenschaftliche Zusammenarbeit möchte ich meine Anerkennung insbesondere meinen Kollegen Herrn Dr. Florian Evers und Herrn Dr. Atheer Al-Rubaye aussprechen.

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Michael Brandl und Herrn Dr. Mykhailo Saienko für ihre wertvollen Hinweise und Anmerkungen bei der Gestaltung der schriftlichen Arbeit.

Nicht zuletzt möchte ich an dieser Stelle meine sowohl in Ilmenau ansässigen als auch in ganz Deutschland und in der ganzen Welt verstreuten Freunde erwähnen. Durch ihre Gesellschaft – sei es im Sportkurs, bei einer Fahrradtour, im gemeinsamen Urlaub oder beim Feiern – konnte ich immer gut abschalten und die nötige Energie für die Doktorarbeit auftanken.

Meinen abschließenden und größten Dank richte ich an meine Eltern und meine Schwester, die mir über tausende Kilometer hinweg und über mehrere Jahre Mut und Ausdauer zugesprochen haben.

Vielen Dank!





## Kurzzusammenfassung

Die Konvergenz der modernen mobilen Kommunikationsnetze zum *Next Generation Network* (NGN) und der Einsatz von Multimode-Endgeräten resultieren in einer Kommunikationsumgebung mit mehreren verfügbaren Kommunikationswegen zwischen einem Endgerät und dem Kernnetz. Dabei spielen die Mobilität und demzufolge der Handover eine entscheidende Rolle. Um während einer Handoverentscheidung den Anforderungen verschiedener mobilen Anwendungen zum Beispiel in Bezug auf *Quality of Service* (QoS) oder Sicherheit Genüge zu tun, sind traditionelle Handoverentscheidungsmethoden aus den Mobilfunknetzen, die im Wesentlichen auf der Auswertung der Empfangssignalstärke basieren, nicht mehr ausreichend. Deswegen wurde in den letzten Jahren eine Reihe von multikriteriellen Handoverentscheidungsmethoden vorgeschlagen. In den vorgeschlagenen Methoden wurden die Themen wie Anwendungssensitivität und Flexibilität der Konfiguration der Handoverentscheidung nicht tief genug analysiert. Weiterhin sind die Optimierungspotentiale während der Handoverentscheidung nicht ausreichend untersucht.

Diese Arbeit adressiert die oben angesprochen Themen und liefert eine Lösung in Form eines ***FL**exible **A**pplication-**S**ensitive **H**andov**Er** **D**ecision **F**rameworks*, kurz FLASHED-Framework. Das FLASHED-Framework ist die Implementierung eines multikriteriellen Handover-Entscheidungsalgorithmus, der auf der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (*Multiple-Criteria Decision Making* (MCDM)) beruht. Das FLASHED-Framework ermöglicht eine flexible, anwendungsabhängige und strukturierte Konfiguration der für eine Handoverentscheidung relevanten Informationssätze.

Außerdem sind im FLASHED-Framework drei Handover-Entscheidungsalgorithmen implementiert, die die Optimierungsziele der Nutzer und der Netzbetreiber repräsentieren und mit deren Hilfe die alternativen Kommunikationswege bewertet werden. Zwei dieser Algorithmen wurden im Rahmen der Untersuchungen der Optimierungsmöglichkeiten für eine Handoverentscheidung durch die Reduzierung der überschüssigen Kapazitäten in Abhängigkeit von Anwendungsanforderungen entwickelt. Beim dritten Algorithmus handelt es sich um einen lastverteilungsorientierten Handover-Entscheidungsalgorithmus.

Die Verifizierung des vorgeschlagenen und implementierten FLASHED-Frameworks inklusive der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen erfolgt in einer im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelten Version der Simulationsumgebung OMNeT++/INET.



## Abstract

The convergence of modern mobile communication networks to the Next Generation Network (NGN) and the usage of multimode mobile devices has resulted in a communication environment characterized by multiple alternative communication paths between a user device and the core network. In such an environment, mobility and handover play an important role. Moreover, the traditional handover decision schemes, based primarily on the evaluation of received signal strength, are not sufficient to fulfill multiple requirements of diverse mobile applications such as *Quality of Service* (QoS) or security. As a consequence, a wide range of multi-criteria handover decision algorithms has been proposed. However, the existing studies analyze the topics of application sensitivity and flexibility of the configuration of handover decision not intensively enough. Moreover, the optimization potential during handover is still an open topic for research.

This study addresses the above described open topics by proposing a ***FL*exible *A*pplication-*S*ensitive *H*andov*Er* *D*ecision Framework** (FLASHED-Framework). The FLASHED-Framework is an implementation of a multi-criteria decision algorithm based predominantly on the ideas of the *Multiple-Criteria Decision Making* (MCDM). The FLASHED-Framework makes possible a flexible application sensitive configuration of the handover-relevant information sets in a structured form.

Furthermore, the FLASHED-Framework contains three different handover decision algorithms, which consider the optimization objectives of the users and the network providers during the alternatives evaluation. Two of these algorithms are based on the idea of surplus reduction with respect to application requirements. The third algorithm is designed to balance the network load during the handover.

The verification of the proposed and implemented FLASHED-Framework including the proposed decision algorithms, was carried out by means of an special enhanced version of simulation environment OMNeT++/INET, which was developed during this study.



# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Zielsetzung der Arbeit . . . . .                                   | 2         |
| 1.3      | Gliederung der Arbeit . . . . .                                    | 4         |
| <b>2</b> | <b>Multikriterielle Entscheidungsanalyse</b>                       | <b>7</b>  |
| 2.1      | Definitionen . . . . .   | 8         |
| 2.2      | MCDM-Prozess . . . . .   | 11        |
| 2.3      | Kriterien in MCDM . . . . .  | 14        |
| 2.3.1    | Klassifizierung der Kriterien . . . . .                            | 15        |
| 2.3.2    | Normierung . . . . .   | 16        |
| 2.3.3    | Priorisierung . . . . .  | 18        |
| 2.4      | Taxonomie für MCDM-Methoden . . . . .                              | 19        |
| 2.5      | Kapitelzusammenfassung . . . . .                                   | 21        |
| <b>3</b> | <b>Entscheidungstechniken für multikriteriellen Handover</b>       | <b>23</b> |
| 3.1      | Einführung . . . . .   | 23        |
| 3.2      | Gruppen von Entscheidungstechniken für multikriterielle Handover . | 27        |
| 3.2.1    | Nutzerzentrische Entscheidungstechnik . . . . .                    | 28        |
| 3.2.2    | Kontextsensitive Entscheidungstechnik . . . . .                    | 28        |
| 3.2.3    | Entscheidungstechnik auf Basis von MCDM-Methoden . . . . .         | 29        |
| 3.2.4    | Zusammenfassung . . . . .  | 32        |
| 3.3      | Kriterien für Handoverentscheidung . . . . .                       | 33        |
| 3.4      | Strukturierung von Eingangsdaten . . . . .                         | 36        |
| 3.5      | Kapitelzusammenfassung . . . . .                                   | 37        |
| <b>4</b> | <b>Neuartige Entscheidungsalgorithmen</b>                          | <b>39</b> |
| 4.1      | Einführung . . . . .   | 39        |
| 4.2      | Optimierung durch Überschussreduzierung . . . . .                  | 40        |
| 4.2.1    | Problembeschreibung und Motivation . . . . .                       | 41        |
| 4.2.2    | ORA-Beschreibung . . . . .   | 43        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.3      | Aggressive Überschussreduzierung . . . . .                        | 44         |
| 4.3.1    | Problembeschreibung und Motivation . . . . .                      | 45         |
| 4.3.2    | AORA-Beschreibung . . . . .                                       | 49         |
| 4.4      | Numerische Simulationen . . . . .                                 | 53         |
| 4.5      | Kapitelzusammenfassung . . . . .                                  | 59         |
| <b>5</b> | <b>Framework für die Handoverentscheidungsphase</b>               | <b>61</b>  |
| 5.1      | Motivation und Einführung . . . . .                               | 61         |
| 5.2      | Konzipierung des FLASHED-Frameworks . . . . .                     | 62         |
| 5.2.1    | Festlegung von Komponententypen . . . . .                         | 63         |
| 5.2.2    | FLASHED-Datenbank . . . . .                                       | 64         |
| 5.2.3    | FLASHED-Datenbank gefüllt mit Beispielkomponenten . . . .         | 66         |
| 5.2.4    | Lastverteilungsorientierter Handover-Entscheidungsalgorithmus     | 66         |
| 5.2.5    | Untersuchung der Gesamtnutzwerte . . . . .                        | 69         |
| 5.2.6    | Parametrierung der Ziele und Kriterien . . . . .                  | 74         |
| 5.2.7    | Entscheidungsalgorithmus für FLASHED-Framework . . . . .          | 76         |
| 5.3      | Fallstudie . . . . .  | 77         |
| 5.3.1    | Konfiguration der Komponenten . . . . .                           | 78         |
| 5.3.2    | Durchführung einer Handoverentscheidung . . . . .                 | 86         |
| 5.4      | Implementierung des FLASHED-Backends . . . . .                    | 87         |
| 5.4.1    | Funktionsblöcke . . . . .   | 88         |
| 5.5      | Kapitelzusammenfassung . . . . .                                  | 90         |
| <b>6</b> | <b>Implementierungen in OMNeT++</b>                               | <b>93</b>  |
| 6.1      | Auswahl einer Simulationsumgebung . . . . .                       | 93         |
| 6.2      | Aufbau von WLAN-Infrastruktur . . . . .                           | 95         |
| 6.3      | Neu implementierte Funktionalitäten in OMNeT++ . . . . .          | 96         |
| 6.3.1    | Passiver regelmäßiger Scan . . . . .                              | 96         |
| 6.3.2    | Sammeln von Kriterienwerten . . . . .                             | 99         |
| 6.3.3    | Lastverteilungskoeffizient . . . . .                              | 101        |
| 6.3.4    | Adaptivität der Bitrate für die Anwendungen . . . . .             | 103        |
| 6.3.5    | Zusätzlich implementierte Statistikfunktionen . . . . .           | 105        |
| 6.3.6    | Anbindung an das FLASHED-Framework . . . . .                      | 105        |
| 6.4      | Zusammenfassung . . . . .   | 108        |
| <b>7</b> | <b>Evaluierung</b>  | <b>111</b> |
| 7.1      | Beschreibung von Simulationsaufbau . . . . .                      | 111        |
| 7.2      | Simulationsergebnisse für das Szenario LowBR_Single_STA . . . . . | 117        |
| 7.3      | Simulationsergebnisse für das Szenario LowBR_Mult_STAs . . . . .  | 122        |

|   |            |
|---|------------|
| <i>Inhaltsverzeichnis</i>   | xv         |
| 7.4 Simulationsergebnisse für das Szenario HighBR_Mult_STAs . . . . . | 125        |
| 7.5 Kapitelzusammenfassung . . . . .                                  | 128        |
| <b>8 Zusammenfassung</b>  | <b>129</b> |
| <b>9 Ausblick</b>   | <b>133</b> |
| <b>A Gesamtnutzwerte von unterschiedlichen MCDM-Methoden</b>          | <b>137</b> |
| <b>B MCDM-Methoden</b>  | <b>141</b> |
| B.1 WSM . . . . .   | 141        |
| B.2 WPM . . . . .   | 141        |
| B.3 TOPSIS . . . . .  | 142        |
| B.4 GRA . . . . .   | 143        |
| B.5 VIKOR . . . . .   | 145        |
| <b>C Analytic Hierarchy Process</b>                                   | <b>147</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>151</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen</b>                        | <b>165</b> |





# 1 Einleitung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit dem Thema der multikriteriellen Handoverentscheidung für mobile heterogene Kommunikationsnetze. Wesentlicher Anteil der Studien in diesem Bereich stützt auf die Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (*Multiple-Criteria Decision Making* (MCDM)). In dieser Arbeit werden deshalb die existierenden MCDM-basierten Handoverentscheidungsmethoden untersucht und offene Themen erörtert. Die aufgedeckten offenen Themen bilden die Motivation für den Entwurf und die Implementierung des ***FL*exible *A*pplication-*S*ensitive *H*andov***E*r *D*ecision Frameworks** (FLASHED-Frameworks) einschließlich der neuen Entscheidungsalgorithmen.**

## 1.1 Motivation

Der heutige Trend bei der Entwicklung moderner Kommunikationsnetze auf Basis der Technologien *Global System for Mobile Communications* (GSM), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), *Long Term Evolution* (LTE), *Wireless Local Area Network* (WLAN) und *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) geht in Richtung Konvergenz. Dieser Trend ist unter dem Begriff *Next Generation Network* (NGN) bekannt. Dabei werden die oben aufgelisteten Kommunikationsnetze wie Zugangsnetze betrachtet, über die der Zugriff auf die Dienste in einem IP-basierten Kernnetz erfolgt. Zusätzlich sieht NGN sogenannte Multimode-Nutzerendgeräte vor, die mit den Schnittstellen für verschiedene Technologien ausgestattet sind und die zwischen verschiedenen Zugangsnetzen nahtlos umschalten können. Durch diese Entwicklung entsteht ein heterogenes mobiles Kommunikationsnetz mit mehreren alternativen Kommunikationswegen zwischen einem Endgerät und dem Kernnetz, basierend auf unterschiedlichen Technologien. Weitere Aspekte der Veränderungen sind die gewachsene Anzahl und Vielfalt der Anwendungen, die auf mobilen Endgeräten verfügbar sind. Viele dieser Anwendungen können Mindestanforderungen an bestimmte Netzwerkcharakteristiken wie zum Beispiel *Quality of Service* (QoS) oder die Sicherheit haben.

In dem oben beschriebenen heterogenen Umfeld spielt die Mobilität eine grundlegende Rolle. Der Handover ist ein wichtiger Mechanismus zur Unterstützung der Mo-

bilität. Die Wegewahlentscheidung während des Handovers in modernen Mobilfunknetzen erfolgt überwiegend durch die Auswertung eines einzigen Kriteriums, nämlich der Empfangssignalstärke (*Received Signal Strength* (RSS)). Aus Sicht vieler Forscher ist diese Wegewahlstrategie für die mobilen heterogenen Netze mit mobilen multimedialen Anwendungen nicht mehr ausreichend. Der heutige Forschungstrend im Bereich Handoverentscheidung geht deshalb in Richtung der multikriteriellen Entscheidungsmethoden. Dabei werden die Charakteristiken der verschiedenen für Handoverentscheidung relevanten Instanzen wie Kommunikationsweg, Endgerät, Nutzer und Anwendung, aber auch Charakteristiken der externen Umgebung in die Wegewahl einbezogen.

Einen breiten Überblick über den Stand der Forschung im Bereich der multikriteriellen Handoverentscheidungsmethoden für mobile heterogene Netze wird in Studien in [ChRBVK13], [KaKP08], [MBCCM11] und [AhBG14] gegeben. Ein wesentlicher Anteil der Studien legt den Fokus auf die MCDM-basierten Handoverentscheidungsmethoden. MCDM ist ein Forschungsgebiet aus dem Bereich Entscheidungstheorie, das sich mit der Strukturierung komplexer Entscheidungsprobleme und mit der Entwicklung von Hilfswerkzeugen für die Entscheidungsträger beschäftigt. Ein Entscheidungsproblem wird strukturiert, indem es in einzelne Schritte und Komponenten zerlegt wird.

Die existierenden Handoverentscheidungsmethoden lassen eine Reihe von Themen offen. Erstens sind die existierenden Methoden durch mangelhafte Flexibilität hinsichtlich Konfiguration der Handoverentscheidung gekennzeichnet. In den meisten Lösungen geht es um eine vorgegebene Menge an Entscheidungskriterien und deren statische Parametrierung. Außerdem ist das Thema Anwendungssensitivität nur schwach adressiert. Es mangelt an Methoden mit integrierten Möglichkeiten für eine flexible anwendungsabhängige Konfiguration der für eine Handoverentscheidung relevanten Informationssätze. Weiterhin wurden die Optimierungspotentiale während der Handoverentscheidung nicht ausreichend untersucht. Zudem wurde durch die Analyse von veröffentlichten Studien ein unzureichender Vergleich der unterschiedlichen MCDM-Methoden im Kontext der Handoverentscheidung festgestellt.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden mögliche Optimierungsansätze während der Handoverentscheidungsphase basierend auf MCDM-Methoden erörtert werden. Bei der Suche nach Optimierungsmöglichkeiten wird der Fokus auf die Reduzierung der Übersättigung bei bestimmten Entscheidungskriterien ausgehend von Anforderungen der aktiven Anwendungen gelegt. Dabei sind mit Übersättigung überschüssige Ressour-

cen wie zum Beispiel verfügbare Bitrate oder Verzögerung gemeint. Die Reduzierung der Übersättigung bei einigen Kriterien kann zu einer Verbesserung der Werte bei anderen Kriterien führen. Es ist möglich, die Übersättigungsreduzierung innerhalb der Normierungsphase des MCDM-Prozesses zu realisieren. Die Übersättigungsreduzierung ist sowohl aus der Perspektive des Nutzers als auch aus der Perspektive des Netzbetreibers gewinnbringend. Auf der einen Seite werden dem Nutzer keine überschüssigen Kapazitäten hinsichtlich einiger Kriterien zugewiesen, wodurch die Werte der anderen Kriterien verbessert werden. Auf der anderen Seite kann der Netzbetreiber auf diese Weise Netzwerkkapazitäten sparen. Zum Beispiel sollen im Falle einer Video-Streaming-Anwendung mit einer bestimmten erforderlichen Bitrate und einer gewissen Verzögerungstoleranz bei der Handoverentscheidung statt teurer Kommunikationswege mit überschüssiger Bitrate und geringer Verzögerung die preiswerteren Kommunikationswege mit akzeptablen Werten für die verfügbare Bitrate und die Verzögerung präferiert werden. In diesem Fall würde der Nutzer durch Übersättigungsreduzierungen hinsichtlich der verfügbaren Bitrate und der Verzögerung sparen. Der Netzbetreiber würde seinerseits von einer besseren Ressourcennutzung profitieren. Eine bessere Ressourcennutzung würde in diesem Beispiel darin bestehen, dass die Basisstationen mit einer großen verfügbaren Bitrate und einer geringen Verzögerung für die Nutzer mit bitratenintensiven und verzögerungskritischen Anwendungen vorgehalten würden.

Weiterhin werden Möglichkeiten zur Übersättigungsreduzierung bei einigen Kriterien auf Kosten der anderen Kriterien überprüft. Dieser Modus wäre für den Netzbetreiber interessant, da er zu einer zusätzlichen Übersättigungsreduzierung führt.

Als Nächstes wird eine detaillierte Analyse des MCDM-Prozesses inklusive seiner Schritte und Komponenten erfolgen und dann in einem sinnvollen Umfang für das Handoverentscheidungsproblem angewendet. Dabei soll eine Umgebung für die Konfiguration und die Durchführung der Handoverentscheidung konzipiert und implementiert werden. Zusätzlich soll diese Umgebung die Konfiguration möglichst vieler für Handoverentscheidungen relevanter Informationssätze in einer flexiblen und strukturierten Form ermöglichen. Diese Umgebung soll auch die Anwendungssensitivität adressieren, indem eine anwendungsabhängige Konfiguration der Informationssätze ermöglicht wird.

Diese Umgebung wird für Evaluierungszwecke implementiert. Die Implementierung der Umgebung bekommt den Namen FLASHED-Framework. Auf Basis der oben beschriebenen Algorithmen sollen Handover-Entscheidungsalgorithmen implementiert und in das FLASHED-Framework integriert werden. Weiterhin sollen die gängigsten MCDM-Methoden zum gegenseitigen Vergleich in diesen Handover-Entscheidungsalgorithmen implementiert werden.

Die Evaluierung des FLASHED-Frameworks einschließlich der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen erfolgt in der Simulationsumgebung OMNeT++/INET. OMNeT++/INET wird dafür mit den für die Simulationsszenarien fehlenden Funktionalitäten erweitert.

Zusammengefasst können die wissenschaftlichen Beiträge dieser Arbeit wie folgt formuliert werden:

- die Ausarbeitung von Algorithmen für die Handoverentscheidungsphase unter Berücksichtigung von Anwendungsanforderungen,
- die Konzeption und eine prototypische Implementierung eines Frameworks für eine umfangreiche flexible anwendungssensitive Handoverentscheidungsphase.

## 1.3 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen von MCDM erläutert. Dabei wird der MCDM-Prozess inklusive seiner Schritte im Detail vorgestellt. Danach werden Entscheidungskriterien untersucht und die Priorisierungs- und Normierungsphasen betrachtet. Am Ende des Kapitels werden die gängigsten MCDM-Methoden beschrieben.

Kapitel 3 ist dem multikriteriellen Handover für mobile Kommunikationsnetze gewidmet. Beginnend mit Motivationen und Grundlagen des Handovers in mobilen Kommunikationsnetzen werden Anforderungen an den Handover aufgelistet und ein Klassifikationsschema vorgestellt. Außerdem werden Beweggründe für den multikriteriellen Handover präsentiert. Im Anschluss folgt die Betrachtung der Handover-Entscheidungskriterien, wobei sowohl auf Probleme wie Identifizierung der relevanten Kriterien als auch auf die Messverfahren und den Transport der Kriterienwerte eingegangen wird. Des Weiteren wird eine breite Reihe an möglichen Kriterien für Handover in einer nach mehreren Attributen strukturierten Tabelle vorgestellt. Anschließend folgt eine Diskussion über den Stand der Forschung im Bereich der multikriteriellen Handoverentscheidungsmethoden, wodurch unbearbeitete Themen aufgedeckt werden.

Kapitel 4 stellt zwei neuartige Algorithmen für die multikriterielle Handoverentscheidung vor. Für beide Algorithmen folgt eine Erläuterung der Motivation anhand anschaulicher Anwendungsfälle. Beim ersten Algorithmus namens *Oversaturation Reduction Algorithm* (ORA), der als eine nutzerorientierte Lösung gilt, geht es um die Optimierung einiger Kriterien durch die Reduzierung der Übersättigung bei anderen Kriterien. Mit Übersättigung werden die überschüssigen Kapazitäten hinsichtlich eines Kriteriums bezeichnet. Der Grad der Übersättigung wird einerseits anhand der

Anwendungsanforderungen und andererseits anhand der aktuell vorhandenen Kapazitäten der alternativen Kommunikationswege pro Kriterium ermittelt. Der zweite Algorithmus, „getauft“ auf den Namen *Aggressive Oversaturation Reduction Algorithm* (AORA), gilt als eine netzwerkbetreiberorientierte Lösung, bei der eine im Vergleich zum ersten Algorithmus stärkere Übersättigungsreduzierung erzielt werden kann. Am Ende des Kapitels wird eine numerische Simulation mit den Simulationsszenarien und deren Ergebnissen aufgeführt.

In Kapitel 5 wird ein flexibles modulares Framework für die multikriterielle anwendungssensitive Handoverentscheidung namens FLASHED-Framework vorgeschlagen. Der erste Abschnitt widmet sich der Konzipierung des FLASHED-Frameworks einschließlich Festlegung seiner logischen Komponententypen und Beschreibung seiner wichtigsten Bestandteile. Am Ende des Abschnittes wird eine Fallstudie vorgestellt, in der das FLASHED-Framework mit Beispieldaten gefüllt wird. Der zweite Abschnitt des Kapitels beschreibt die Implementierung des Backends für das FLASHED-Framework inklusive seiner Funktionsblöcke.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit den im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Implementierungen in der Simulationsumgebung OMNeT++/INET. Es werden folgende in OMNeT++/INET implementierte Funktionalitäten vorgestellt: passiver regelmäßiger Scan, Sammeln der Werte für die Handoverkriterien in der WLAN *Stations* (STAs) und Adaptivität der Anwendungsbitrate. Danach wird die Realisierung der Kopplung des FLASHED-Frameworks an OMNeT++/INET beschrieben.

Kapitel 7 behandelt die Evaluierung des vorgeschlagenen FLASHED-Frameworks inklusive der konzipierten Entscheidungsalgorithmen (ORA, AORA) und eines lastverteilungsorientierten Algorithmus. Für die Evaluierung wurde die Simulationsumgebung OMNeT++/INET mit den in Kapitel 6 beschriebenen Weiterentwicklungen verwendet. Für die Simulationen wird eine WLAN-Infrastruktur modelliert. Es werden drei Simulationsszenarien definiert, die sich in der Anzahl der WLAN STAs und in dem Volumen des Anwendungsverkehrs unterscheiden. Jedes Szenario beinhaltet seinerseits fünf Modi. In jedem Modus kommen unterschiedliche Algorithmen zum Einsatz. Dabei beruht der erste Modus auf einem traditionellen MCDM-Entscheidungsverfahren und dient als Referenzmodus. Die restlichen vier Modi setzen die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Algorithmen ORA, AORA und den lastverteilungsorientierten Algorithmus ein. Jeder Modus besteht seinerseits aus fünf Sub-Modi, bei denen unterschiedliche MCDM-Methoden wie WSM, WPM, TOPSIS, GRA, VIKOR zum Einsatz kommen. Letztendlich werden für jeden Sub-Modus zehn Durchläufe konfiguriert. Für jeden Durchlauf werden den *Access Points* (APs) unterschiedliche Kosten und maximale Bitraten zugewiesen. Am Ende des Kapitels werden die Simulationsergebnisse tabellarisch und grafisch dargestellt und diskutiert.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und analysiert.

Abschließend werden in Kapitel 9 Richtungen für die zukünftige Forschung aufgezeichnet, die auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbauen können.

## 2 Multikriterielle Entscheidungsanalyse

Multikriterielle Entscheidungsanalyse, auf englisch Multiple-Criteria Decision Analysis (MCDA), auch Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) genannt, ist ein Forschungsgebiet aus dem Bereich des Operational Research, welches sich mit der Untersuchung der multikriteriellen Entscheidungsprozesse beschäftigt. In verschiedenen Bereichen der menschlichen Tätigkeit wie zum Beispiel im privaten Umfeld oder auch bei komplexen technischen Verfahren, wirtschaftlichen Analysen und in der Politik stehen die Entscheidungsträger oft vor der Herausforderung, bei der Auswahl einer Alternative eine große Menge an unterschiedlichen Kriterien zu berücksichtigen. Dabei kann es sich um Alternativen und Kriterien beliebiger Natur handeln. Ein Paradebeispiel für eine multikriterielle Entscheidung ist die Wegewahl beim Handover in Mobilfunknetzen unter Berücksichtigung von QoS-Parametern. Das Ziel von MCDM ist die Strukturierung des Entscheidungsprozesses und die Ausarbeitung von Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung des Entscheidungsfällers. Trotz der Tatsache, dass einige multikriterielle Entscheidungsmethoden schon seit Jahrhunderten bekannt sind, hat MCDM als Forschungsdisziplin erst in der modernen Zeit an Aufmerksamkeit gewonnen. Der Anfang des MCDM-Forschungsgebietes geht in die siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts zurück. J.L. Cochrane und M. Zeleny gelten als Gründer dieses Forschungsgebietes. Einen guten Überblick über MCDM geben Bücher wie [YoHw95, HwYo81, ZiGu91]

Heutzutage existieren zahlreiche MCDM-Methoden, die ihre breite Akzeptanz und Anwendung in verschiedensten Bereichen finden. „Das ist keine Übertreibung zu behaupten, dass fast jede Entscheidung in der Politik, Industrie oder Wirtschaft auf die eine oder andere Weise die Bewertung von Alternativen basierend auf einer Reihe von verschiedenen Kriterien einbezieht“ (frei übersetzt aus [TrSS98]).

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die MCDM-Grundlagen. Zuerst werden die MCDM-Definitionen erläutert. Danach wird der MCDM-Prozess vorgestellt. Der anschließende Abschnitt beschäftigen sich mit Kriterien inklusive der kriterienbezogenen Operationen wie Normierung und Priorisierung. Der letzte Abschnitt stellt das Klassifikationsschema der MCDM-Methoden vor.

## 2.1 Definitionen

Im Weiteren werden die wichtigsten MCDM-Begriffe beschrieben. Der Handover zwischen einem Mobilfunknetz und mehreren WLANs wird für die Veranschaulichung der Beschreibung als Beispiel benutzt.

- *Alternativen*: In der MCDM-Sprache werden unter Alternativen mögliche Problemlösungen verstanden. Die Alternativen eines Entscheidungsprozesses für das vorliegende Beispiel stellen die Kommunikationswege über WLANs oder über Mobilfunknetz dar.
- *Ziele* (engl. *goals*): Die Vorgaben an die Ergebnisse eines Entscheidungsprozesses werden als Hauptziele oder einfach als Ziele bezeichnet. Ein Ziel kann sich aus mehreren Unterzielen zusammensetzen. Die Unterziele werden dem Ziel hierarchisch untergeordnet. Es ist wichtig, die Ziele mit allen Unterzielen am Anfang eines Entscheidungsprozesses möglichst klar zu definieren. Das Ziel für eine Handoverentscheidung könnte die Auswahl des sichersten oder des qualitativ besten Kommunikationsweges sein.
- *Kriterien, Entscheidungskriterien* oder *Attribute*: Die Kriterien, Entscheidungskriterien oder Attribute sind sowohl verschiedene Charakteristiken der Alternativen, als auch verschiedene Umgebungsfaktoren (wie zum Beispiel Uhrzeit, Datum oder Standort), die in den Entscheidungsprozess sinnvoll eingebracht werden können. Im Weiteren werden die Begriffe Kriterien und Entscheidungskriterien als Synonyme benutzt. Als Kriterien für Handover können zum Beispiel QoS-Charakteristiken und sicherheitsrelevante Kriterien verwendet werden.
- *Mindestanforderungen an Kriterien* (engl. *criteria constraints*): die Schwellenwerte für die Wertebereiche der Kriterien. Sie werden üblicherweise in Abhängigkeit von Anwendungsanforderungen oder Nutzerpräferenzen gesetzt.
- *Zulässiger Bereich* (engl. *feasible range*): der Wertebereich eines Kriteriums, in welchem alle Werte den gesetzten Mindestanforderungen genügen.
- *Zulässige Alternative* (engl. *feasible solution*): Eine zulässige Alternative ist eine Alternative, bei der alle Kriterien den Mindestanforderungen genügen.
- *Normierung*: Bei der Normierung geht es um die Transformation der oft unterschiedlichen Wertebereiche der Kriterien auf einen einheitlichen Wertebereich. Am häufigsten wird der Wertebereich  $[0, 1]$  benutzt.



- *Nutzenfunktion* oder *Wertefunktion* (engl. *utility function*): Dabei geht es um eine mathematische Funktion, die die Normierung der Kriterienwerte eines Kriteriums beschreibt. Im Weiteren wird der Begriff Nutzenfunktion benutzt.
- *Präferenzen* oder *Gewichte* (engl. *weights*): Über Präferenzen oder Gewichte der Kriterien wird die Wichtigkeit jedes Kriteriums relativ zu allen anderen Kriterien angegeben.
- *Entscheidungsmatrix* (engl. *decision matrix*, *payoff matrix*): Eine Entscheidungsmatrix ist eine zweidimensionale Darstellung der Alternativen einschließlich ihrer Kriterienwerte. Jedem Kriterium  $k_j \in K$  wird dabei eine Präferenz  $w_j \in W$  zugewiesen. Eine Entscheidungsmatrix ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

| Alternativen | Kriterien |          |          |     |          |
|--------------|-----------|----------|----------|-----|----------|
|              | $k_1$     | $k_2$    | $k_3$    | ... | $k_N$    |
| $A_1$        | $x_{11}$  | $x_{12}$ | $x_{13}$ | ... | $x_{1N}$ |
| $A_2$        | $x_{21}$  | $x_{22}$ | $x_{23}$ | ... | $x_{2N}$ |
| $A_3$        | $x_{31}$  | $x_{32}$ | $x_{33}$ | ... | $x_{3N}$ |
| ...          | ...       | ...      | ...      | ... | ...      |
| $A_M$        | $x_{M1}$  | $x_{M2}$ | $x_{M3}$ | ... | $x_{MN}$ |

Tabelle 2.1: Entscheidungsmatrix

- *Ideale Lösung* (engl. *ideal solution*): Die ideale Lösung stellt eine künstliche Alternative dar, die sich aus den besten Kriterienwerten aller Alternativen zusammensetzt. Die ideale Lösung aus der Entscheidungsmatrix aus Tabelle 2.2 ist  $A^* = \{64, 43, 76\}$ .

| Alternativen | Kriterien |           |           |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
|              | $k_1$     | $k_2$     | $k_3$     |
| $A_1$        | 12        | 21        | 34        |
| $A_2$        | 23        | 34        | 56        |
| $A_3$        | <b>64</b> | 32        | 32        |
| $A_4$        | 34        | <b>43</b> | 9         |
| $A_5$        | 23        | 32        | <b>76</b> |

Tabelle 2.2: Entscheidungsmatrix für fünf Alternativen mit drei Kriterien mit Beispielkriterienwerten. Um das Beispiel einfach zu halten, wird hier angenommen, dass alle drei Kriterien die gleichen Wertebereiche haben.

- *Anti-ideale Lösung* (engl. *anti-ideal solution*, *nadir solution*): Die anti-ideale Lösung stellt eine künstliche Alternative dar, die sich aus den schlechtesten Kriterienwerten, aller Alternativen zusammensetzt. Die anti-ideale Lösung aus der Entscheidungsmatrix aus Tabelle 2.2 ist  $A^- = \{12, 21, 9\}$ .
- *Nicht dominierte Lösung* (engl. *non-dominated solution*): Nicht dominierte Lösung ist eine Alternative, bei der die Werte aller Kriterien besser als andere

oder gleich als der anderen Alternativen sind. Nicht dominierte Lösung gibt es nicht für jeden Entscheidungsfall.

- *Teilnutzwert*: Der Teilnutzwert ist die Ausprägung eines Kriteriums bei der Bewertung einer Alternative. Der Teilnutzwert wird während der Normierung für jedes Kriterium für jede Alternative berechnet.
- *Gesamtnutzwert* (engl. *Score*): Der Gesamtnutzwert ist eine gewichtete Summe aller Teilnutzwerte einer Alternative.
- *MCDM-Methoden, MCDM-Algorithmen* oder *MCDM-Rankingalgorithmen*: Dabei geht es um die Methoden, die die Erstellung einer Rangliste der Alternativen ermöglichen. In die Erstellung der Rangliste fließen Kriterienwerte, Kriteriengewichte und Nutzenfunktionen ein. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff der MCDM-Methoden benutzt. Die für Handoverentscheidung gängigsten MCDM-Methoden werden in Abschnitt B im Detail beschrieben.
- *MCDM-Prozess*: Der MCDM-Prozess definiert logische Komponenten und gliedert das Entscheidungsproblem in mehrere Schritte. Abschnitt 2.2 beschäftigt sich ausführlich mit dem MCDM-Prozess.
- *Entscheidungsfäller* oder *Entscheidungsträger*: Eine Person, die für die Gestaltung des Entscheidungssystems zuständig ist. Es wird vorausgesetzt, dass sie über ein breites Expertenwissen im betreffenden Bereich verfügt.
- *Variablen*: Für die mathematischen Auslegungen in dieser Arbeit werden Variablen aus Tabelle 2.3 verwendet.

| Bezeichnung   | Bedeutung  |
|---------------|--|
| $M$           | die Anzahl der Alternativen  |
| $N$           | die Anzahl der Kriterien   |
| $I$           | eine Indexmenge aller Alternativen, $I = \{1, 2, \dots, M\}$                                       |
| $J$           | eine Indexmenge aller Kriterien, $J = \{1, 2, \dots, N\}$  |
| $i$           | ein Index einer Alternative, $i \in I$   |
| $j$           | ein Index eines Kriteriums, $j \in J$  |
| $A$           | die Menge der Alternativen   |
| $A_i$         | $i$ -te Alternative, $A_i \in A$   |
| $K$           | die Menge der Kriterien  |
| $k_j$         | $j$ -tes Kriterium, $k_j \in K$  |
| $X_j$         | der Wertebereich des $j$ -ten Kriteriums   |
| $x_{ij}$      | der Wert der Alternative $i$ und des Kriteriums $j$ , $x_{ij} \in X_j$                             |
| $x_{\min_j}$  | der minimale Wert des Kriteriums $j$ , $x_{\min_j} \in X_j$  |
| $x_{\max_j}$  | der maximale Wert des Kriteriums $j$ , $x_{\max_j} \in X_j$  |
| $X_{f_j}$     | der zulässige Wertebereich des $j$ -ten Kriteriums, $X_{f_j} \subset X_j$                          |
| $x_{f\min_j}$ | die untere Grenze des zulässigen Wertebereiches des $j$ -ten Kriteriums, $x_{f\min_j} \in X_{f_j}$ |
| $x_{f\max_j}$ | die obere Grenze des zulässigen Wertebereiches des $j$ -ten Kriteriums, $x_{f\max_j} \in X_{f_j}$  |
| $r_j$         | der normierte Wert des Kriteriums $j$  |
| $\bar{r}_j$   | der Durchschnittswert der normierten Werte des Kriteriums $j$                                      |
| $W$           | ein Kriterienpräferenzvektor, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$                                       |
| $w_j$         | das Gewicht (die Präferenz) des Kriteriums $j$ , $w_j \in W$                                       |
| $A^*$         | ideale Lösung  |
| $A^-$         | anti-ideale Lösung   |
| $S$           | Gesamtnutzwert einer Alternative   |
| $E$           | Entropie   |
| $V$           | Varianz  |

Tabelle 2.3: Variablen für die mathematische Auslegungen für diese Arbeit

## 2.2 MCDM-Prozess

In den MCDM-Grundlagenquellen [ChHa83, BeSt02] wird die Lösung eines Entscheidungsproblems als Prozess aus fünf Schritten betrachtet. Dabei werden Ziele, Kriterien und Alternativen als zentrale Komponenten des MCDM-Prozesses angesehen. Diese Komponenten lassen sich in einer Baumstruktur zusammenfassen. Ein MCDM-Baum für ein multikriterielles Handoverentscheidungsproblem ist zur Veranschaulichung der Komponenten in Abbildung 2.1 vorgestellt. [ChHa83, BeSt02] schlagen folgende fünf Schritte für die Lösung von Entscheidungsproblemen vor:

1. Identifizierung des Entscheidungsproblems – Die Analyse des betrachteten Systems, die Formulierung der Problemstellung und das Definieren der gewünschten Ziele
2. Strukturierung des Entscheidungsproblems – Die Komponenten des Entscheidungsproblems Ziele, Kriterien und Alternativen werden hier genau definiert. Außerdem werden die Wertebereiche für die Kriterien festgelegt.
3. Erstellung eines Modells – Das Modell in diesem Kontext wird nach [ChHa83] wie folgt definiert: „A collection of key variables and their logical (or physical) relationships that together facilitate effective and meaningful comprehensive

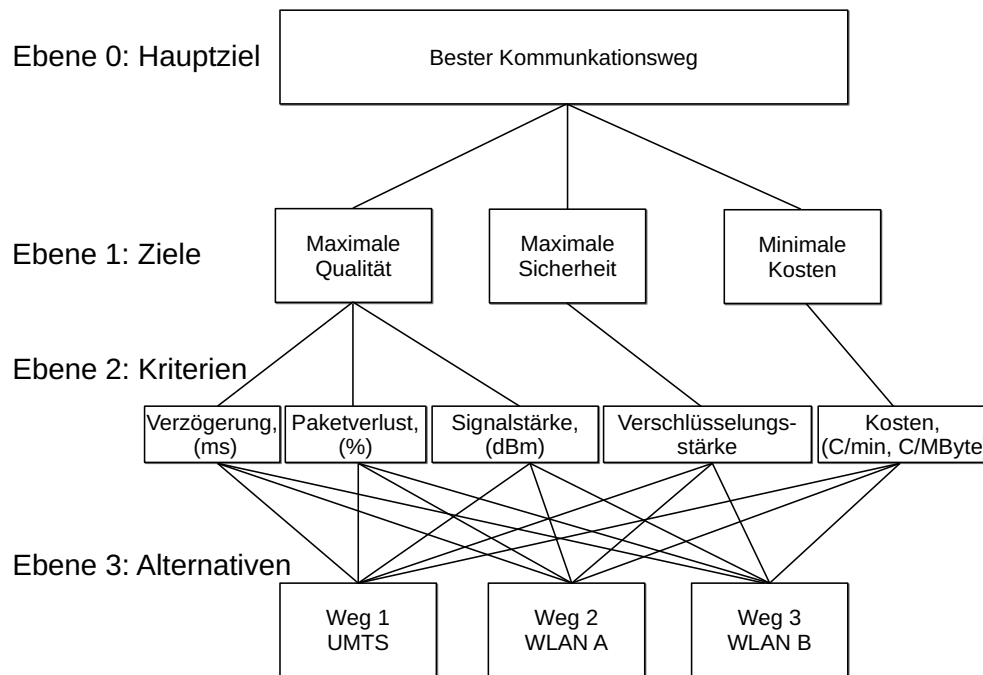


Abbildung 2.1: Die Komponenten des MCDM-Prozesses am Beispiel des Entscheidungsproblems für den Handover, zusammengefasst in einer Baumstruktur

*analysis of the pertinent aspects of the system*“. Mit anderen Worten, es werden die Komponenten des Entscheidungsproblems in einem System zusammengefasst, mit dem eine zielführende Bewertung der Alternativen möglich ist.

4. Bewertung der Alternativen – Hier werden die Alternativen mit Hilfe des Modells bewertet. Das Ergebnis dieser Bewertung ist eine Rangliste der Alternativen.
5. Analyse der Ergebnisse – Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der im ersten Schritt definierten Ziele auf ihre Plausibilität überprüft.

In den Studien [GeLe14, MCMD09, BBHJ<sup>+</sup>01], die sich mit der Anwendung der MCDM-Methoden beschäftigen, wurde der MCDM-Prozess durch die Einführung weiterer Prozessschritte etwas feiner untergliedert. Am detailliertesten wird der MCDM-Prozess in [GeLe14] betrachtet. In dieser Studie wird der MCDM-Prozess auf die folgenden neun Schritte heruntergebrochen:

1. Definition des Entscheidungsproblems
2. Identifikation der Alternativen
3. Ermittlung des Zielsystems

4. Offenlegung der Kriterien und Darstellung in einer Hierarchie
5. Offenlegung der Nutzenfunktionen für die Normierung der Kriterienwerte
6. Ermittlung der subjektiven Kriterienpriorisierung
7. Ermittlung der Kriterienwerte
8. Die Aggregation der Kriterienwerte mittels der gewählten Methode und Erstellung einer Rangfolge
9. Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und Beurteilung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die in [GeLe14] vorgeschlagen Schritte des MCDM-Prozesses anhand eines beispielhaften Entscheidungsproblems für den Handover beschrieben.

*Schritt 1. Definition des Entscheidungsproblems und des Hauptzieles*

Am Anfang eines Entscheidungsprozesses sollen der Gegenstand des Entscheidungsproblems und die verfolgten Ziele definiert werden.

Das Entscheidungsproblem und somit das Hauptziel für das vorliegende Beispiel lässt sich wie folgt formulieren: Bestimmung des besten Kommunikationsweges während einer Handoverentscheidung unter Berücksichtigung von mehreren Zielen wie zum Beispiel: QoS, Sicherheit, Kosten.

*Schritt 2. Identifikation der Alternativen*

Die Alternativen im vorliegenden Beispiel sind ein Kommunikationsweg über UMTS und zwei Kommunikationswege über zwei unterschiedliche WLANs:

- Weg 1 – UMTS,
- Weg 2 – WLAN A,
- Weg 3 – WLAN B.

*Schritt 3. Ermittlung des Zielsystems*

In diesem Schritt werden Ziele festgelegt, durch die das Hauptziel charakterisiert wird. Ziele können in eine Struktur mit mehreren Hierarchieebenen eingeordnet werden.

Für das vorliegende Beispiel wurden die Ziele QoS, Sicherheit und Kosten schon im Schritt 1 aufgelistet. Diese Ziele befinden sich auf der gleichen Hierarchieebene.

*Schritt 4. Offenlegung der Kriterien*

Als Nächstes gilt es die Kriterien für die im Schritt 3 definierten Ziele zu ermitteln.

Mögliche Kriterien sind für das vorliegende Beispiel zusammen mit den anderen Komponenten Hauptziel, Ziele und Alternativen in Form einer Baumstruktur in Abbildung 2.1 vorgestellt.

*Schritt 5. Offenlegung der Nutzenfunktionen für die Normierung der Kriterienwerte*

In diesem Schritt werden unterschiedliche Wertebereiche aller Kriterien auf eine einheitliche Skala übertragen. Die Normierung kann mit Hilfe der Nutzenfunktionen der Kriterien erfolgen. Die Normierung wird im Detail in Abschnitt 2.3.2 beschrieben.

*Schritt 6. Ermittlung der subjektiven Kriterienpriorisierung*

In diesem Schritt wird jedes Kriterium relativ zu allen anderen Kriterien gewichtet. Es gibt verschiedene Methoden für die Festlegung der Gewichte der Kriterien. Mehr dazu in Abschnitt 2.3.3.

*Schritt 7. Ermittlung der Kriterienwerte*

In diesem Schritt werden die Werte aller festgelegten Kriterien für jede Alternative ermittelt.

*Schritt 8. Die Aggregation der Kriterienwerte mittels der gewählten Methode und Erstellung einer Rangfolge*

In diesem Schritt werden die Alternativen gemäß gewählter MCDM-Methode bewertet. Basierend auf der Bewertung wird eine Rangliste der Alternativen erstellt. Die einzelnen MCDM-Methoden werden in Abschnitt B vorgestellt.

*Schritt 9. Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und Beurteilung der Ergebnisse*

Im letzten Schritt werden die erzielten Ergebnisse hinsichtlich des Erreichens der definierten Ziele evaluiert. Dabei werden die Einflüsse von Eingangsparametern wie Kriteriengewichte, Nutzenfunktion, Normierungstechnik auf die erzielten Ergebnisse untersucht. Ein weiterer Punkt der Ergebnisbeurteilung ist die Stabilitätsprüfung. Bei einer Stabilitätsprüfung wird getestet, ob bei gleichen oder ähnlichen Eingangsparametern das Ergebnis gleich oder ähnlich bleibt.

## 2.3 Kriterien in MCDM

Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, stellen die Kriterien Charakteristiken verschiedenster Natur dar, die für den Entscheidungsprozess sinnvoll verwendet werden können. Über die Kriterien werden die Alternativen bewertet. Deswegen müssen die Kriterien messbar und quantitativ darstellbar sein. Die Kriterienwerte einer Alternative werden auch als Kriterienausprägungen bezeichnet. Ein Kriterienwert gibt an, inwieweit eine Alternative das vom Entscheidungsfälle definierte Ziel im Hinblick auf das jeweilige Kriterium erreicht.

### 2.3.1 Klassifizierung der Kriterien

Die Kriterien lassen sich anhand verschiedener Attribute in mehrere Gruppen unterteilen. Ein Klassifikationsschema für Kriterien ist in Tabelle 2.4 dargestellt. Im Folgenden werden die Klassifizierungsattribute und die Gruppen aus dieser Tabelle erklärt.

| Klassifizierungsattribute              | Gruppen              | Beispiele                           |
|--|----------------------|-------------------------------------|
| gegenseitiger Einfluss                 | unterstützend        | Signalstärke und verfügbare Bitrate |
|  | im Konflikt stehend  |                                     |
|  | unabhängig           | Signalstärke und Kosten             |
| Einfluss auf die Alternativen          | Wertekriterien       | verfügbare Bitrate                  |
|  |                      | Signalstärke                        |
|  | Kostenkriterien      | Verzögerung                         |
| Art der Kriterienbewertung             | qualitativ           | Mean Opinion Score (MOS)            |
|  | quantitativ          | Bitrate                             |
|  |                      | Signalstärke                        |
| Typ der mathematischen Zusammensetzung | additiv              | Verzögerung                         |
|  | konkav (Minimalwert) | verfügbare Bitrate                  |
|  | multiplikativ        | Paketverlust                        |
| Komplexität                            | atomar/einfach       | Verzögerung                         |
|  | komplex              | Signalstärke                        |
|  |                      | QoS                                 |

Tabelle 2.4: Klassifizierung der Kriterien

Die unterstützenden Kriterien haben eine gegenseitige positive Wirkung. Die Steigerung der Werte eines Kriteriums zieht die Steigerung der Werte des anderen Kriteriums nach sich. Die im Konflikt stehenden Kriterien beeinflussen einander negativ. Unabhängige Kriterien üben keine gegenseitige Wirkung aus.

Die Kriterien, die mit Wachstum ihrer Werte auf den Gesamtnutzwert der Alternative positiv wirken, sind Wertekriterien. Kostenkriterien bewirken das Gegenteil. In einem Entscheidungsprozess wird versucht, die Wertekriterien wie zum Beispiel Bitrate oder Signalstärke zu maximieren und die Kostenkriterien wie Verzögerung oder Verbindungskosten zu minimieren. Es empfiehlt sich in einem Entscheidungsprozess alle Kriterien vor der Alternativenbewertung in Wertekriterien oder in Kostenkriterien umzuwandeln, damit alle Kriterienwerte entweder maximiert oder minimiert werden können. Eine solche Umwandlung geschieht im Rahmen der Normierungsphase (siehe Abschnitt 2.3.2).

Die quantitativen Kriterien haben im Gegensatz zu qualitativen Kriterien eine eindeutige Maßeinheit und einen eindeutigen Wertebereich. Somit lassen sie sich mit technischen Mitteln objektiv messen. Die qualitativen Kriterien lassen sich nicht mit technischen Mitteln messen. Die Werte solcher Kriterien werden deshalb subjektiv mit Hilfe von Probanden (Testpersonen) eingeschätzt und mit Punkte-Skalen bewertet. Das Beispiel für ein qualitatives Messverfahren ist der Mean Opinion Score (MOS)

definiert in ITU-T P.800.1 [ITU-16], welches für die Sprachqualität-Bewertung bei Telefonaten benutzt wird.

In manchen Fällen besteht eine Alternative aus mehreren Teilen, wo jeder Teil einzeln durch die Kriterienwerte charakterisiert wird. Ein praktisches Beispiel dazu ist ein Kommunikationspfad (engl. *communication path*), der aus mehreren Teilwegen (engl. *links*) besteht. In diesem Fall müssen die Kriterienwerte mehrerer logischer Teile zusammengesetzt werden.

Es wird zwischen *einfachen* oder *autonomen* und *komplexen* Kriterien unterschieden. Ein komplexes Kriterium setzt sich aus einer Reihe autonomer Kriterien zusammen.

Für den Spezialfall Handover in Mobilfunknetzen werden Kriterien hinsichtlich der Instanz, die sie charakterisieren, wie folgt nach [ChRBVK13] klassifiziert:

- netzwerkbezogen (Sicherheit, QoS, monetäre Kosten etc.),
- nutzerbezogen (Nutzerpräferenzen, Vertragskonditionen etc.),
- endgerätebezogen (Standort, Akkulaufzeit, Geschwindigkeit etc.),
- anwendungsbezogen (QoS-Anforderungen, Sicherheitsanforderungen etc.).

Eine weitere Gruppe lässt sich dieser Liste anfügen, nämlich die Umweltkriterien oder Umgebungsfaktoren. Beispiele für die Umweltkriterien sind Zeit, Datum oder Standort.

### 2.3.2 Normierung

Da die Alternativen durch verschiedene Kriterien unterschiedlicher Natur charakterisiert werden können, kommt es häufig vor, dass die Kriterien unterschiedliche Maßeinheiten und Wertebereiche haben. Deswegen besteht die Notwendigkeit zur Normierung der Kriterienwerte. Bei der Normierung handelt es sich um die Transformation der unterschiedlichen Wertebereiche auf einen einheitlichen Wertebereich üblicherweise von 0 bis 1. Die gängigsten Normierungstechniken sind in Tabelle 2.5 aufgelistet.

Die ersten drei Normierungstechniken aus Tabelle 2.5 sind für die sogenannte Rankingabnormalität anfällig. Als Rankingabnormalität wird eine Änderung der Rangliste der Alternativen durch das Löschen einer schwachen Alternative bezeichnet, bei der es zu einer Änderung der Rangordnung der starken Alternativen kommt. Mit starken Alternativen sind die Alternativen mit einem höheren Ranking als die gelöschte Alternative gemeint. Zum Beispiel spricht man von der Rankingabnormalität bei einer Menge der Alternativen  $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$  und einer Rangliste  $R =$



| Name                        | für Wertekriterien  | für Kostenkriterien   | Quelle           |
|-----------------------------|---|---|------------------|
| Vektornormierung            | $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M x_{ij}^2}}$                                    | $r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M x_{ij}^2}}$                                | [ZiGu91, HwYo81] |
| Max-Normierung              | $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_{i \in I} x_{ij}}$   | $r_{ij} = \frac{\min_{i \in I} x_{ij}}{x_j}$  | [ZiGu91, HwYo81] |
| Max-Min-Normierung          | $r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{i \in I} x_{ij}}{\max_{i \in I} x_j - \min_{i \in I} x_j}$ | $r_{ij} = \frac{\max_{i \in I} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{i \in I} x_j - \min_{i \in I} x_j}$ | [ZiGu91, HwYo81] |
| absolute Max-Min-Normierung | $r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}}$                            | $r_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}}$                            | [HuIm10]         |

Tabelle 2.5: Normierungstechniken

$\{A_2, A_3, A_1, A_4\}$ , wenn sich durch das Löschen der Alternative  $A_4$  die Rangliste der restlichen Alternativen ändert und zum Beispiel die Form  $R = \{A_3, A_1, A_2\}$  annimmt. Die Ursache der Rankingabnormalität bei den ersten drei Normierungstechniken aus Tabelle 2.5 ist die mathematische Besonderheit in der Funktionsweise dieser Techniken, bei der die Kriterienwerte einer Alternative die Normierung anderer Alternativen beeinflussen. Im Falle von Vektornormierung fließen die Kriterienwerte aller Alternativen in die Berechnung rein. Im Falle der Max-Normierung und der Max-Min-Normierung kann es dazu kommen, dass eine schwache Alternative bei einem Kriterium den maximalen Wert von allen Alternativen hat. Somit würde der Wert dieser schwachen Alternative die Normierung des jeweiligen Kriteriums der restlichen Alternativen beeinflussen. Wenn diese schwache Alternative aus der Liste gelöscht wird, kann es zu einer Änderung der Rangliste der restlichen Alternativen kommen.

Die Problematik der Rankingabnormalität wurde in [HuIm10] untersucht und eine rankingabnormalitätsfreie absolute Max-Min-Normierung (siehe Tabelle 2.5) vorgeschlagen. Bei der absoluten Max-Min-Normierung werden absolute Grenzwerte  $x_{\min j}$  und  $x_{\max j}$  für Kriterienbereiche für jedes Kriterium verwendet. Somit wird der Einfluss der Alternativen auf die Normierungsphase nicht eigener Kriterienwerte eliminiert, womit auch die Rankingabnormalität ausgeschlossen wird. Die Werte  $x_{\min j}$  und  $x_{\max j}$  müssen vom Entscheidungsfälle explizit definiert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Normierung sind die Kriterien mit nichtlinearen Einflüssen ihrer Werte auf das Entscheidungsergebnis. Alle oben aufgelisteten Normierungstechniken eignen sich nur für die Kriterien mit einem linearen Einfluss. Um einen Informationsverlust bei der Normierung der Kriterien mit nichtlinearen Charakteristiken zu vermeiden, müssen die Kriterien mit Hilfe von speziellen Nutzenfunktionen normiert werden. Die Nutzenfunktion (engl. *utility function*)  $f(x)$  eines

Kriteriums beschreibt die Normierung des kriterienspezifischen Wertebereiches auf einen einheitlichen Wertebereich.

Die Festlegung der Nutzenfunktionen ist ein komplizierter Prozess, der ein umfangreiches Wissen über das zu bewertende Themengebiet im Ganzen und über den Einfluss jedes Kriteriums auf die Alternativen im Einzelnen voraussetzt.

### 2.3.3 Priorisierung

Bei multikriteriellen Entscheidungsprozessen besteht oft die Notwendigkeit, die Alternativenbewertung durch jeweilige Kriterien unterschiedlich stark beeinflussen zu lassen. Dafür werden Kriterien relativ zueinander gewichtet, wonach jedem Kriterium ein Gewicht üblicherweise im Bereich von 0 bis 1 oder von 0 bis 100 zugewiesen wird. Dabei soll die Summe aller Kriteriengewichte jeweils 1 oder 100 sein. Die Priorisierung der Kriterien kann sowohl rein manuell als auch mit Hilfe von speziellen Methoden bewerkstelligt werden.

Generell lassen sich alle Priorisierungsmethoden in zwei Gruppen unterteilen, in subjektive und objektive Methoden. Die Gewichte bei subjektiven Methoden werden durch den Nutzer vorgegeben. Bei objektiven Verfahren werden keine Nutzerpräferenzen berücksichtigt, sondern die Gewichte werden in Abhängigkeit zu der Entropie oder Varianz berechnet. Die Grundidee bei objektiven Verfahren nach [HwYo81] liegt darin, dass ein Kriterium mit kleiner Werteabweichung über alle Alternativen einen geringen Einfluss auf die Entscheidung hat. Ein Kriterium mit gleichen Werten über alle Alternativen hat demnach keine Relevanz auf die Entscheidung und muss demzufolge bei der Alternativenbewertung nicht berücksichtigt werden.

Die am häufigsten benutzte subjektive Priorisierungsmethode ist Analytic Hierarchy Process (AHP). Bei Priorisierung mittels AHP werden alle Kriterien paarweise verglichen und nach der Saaty-AHP-Skala nach Tabelle C.1 bewertet. Die Ergebnisse dieses paarweisen Vergleiches fließen in die Entscheidungsmatrix ein, aus welcher die Kriteriengewichte mittels Matrix-Eigenvektor berechnet werden. Mehr dazu in Abschnitt C.

Die entropiebasierte Priorisierung nach [HwYo81] ist in folgender Gleichung vorgestellt:

$$\begin{aligned}
 E_j &= -\frac{1}{\ln M} \sum_{i=1}^M r_{ij} \ln(r_{ij}), \\
 \implies w_j &= \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^N (1 - E_j)}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Die varianzbasierte Priorisierung nach [JCYW<sup>+</sup>08] wird wie folgt berechnet:

$$V_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{M\bar{r}_j}}, \quad (2.2)$$

$$\implies w_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^J V_j}$$

## 2.4 Taxonomie für MCDM-Methoden

In den letzten Jahrzehnten wurden viele MCDM-Methoden entwickelt. Die existierenden MCDM-Methoden lassen sich nach dem Schema in Tabelle 2.6 klassifizieren.

Auf der ersten Ebene werden die Methoden aufgrund von Lösungsraumeigenschaften in Multiple-Objective Decision Making (MODM) und Multiple-Attribute Decision Making (MADM) unterteilt. MODM wurde für einen stetigen und MADM für einen diskreten Lösungsraum entwickelt. Mit anderen Worten geht es bei MODM um das Erstellen einer optimalen Alternative aus einer Menge der Kriterienwerte. Im Gegensatz dazu betrachtet MADM eine endliche Menge der *a priori* bekannten Alternativen und wählt die beste Alternative aus. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den MADM-Methoden, da es bei dem in dieser Arbeit untersuchten Wegewahlentscheidungsproblem beim Handover um eine endliche und bekannte Menge der Alternativen geht.

Die MADM-Methoden lassen sich ihrerseits in zwei Gruppen unterteilen, nämlich in sogenannte klassische Methoden und Outranking-Methoden. Bei klassischen Methoden liegt das Prinzip zugrunde, bei dem der Gesamtnutzwert jeder Alternative durch die Zusammensetzung der Werte aller Kriterien berechnet wird. AHP wird in Tabelle 2.6 zwar den klassischen Methoden zugeordnet, hat aber eine besondere Funktionsweise (mehr zu AHP in Abschnitt C). Bei Outranking-Methoden wird der Gesamtnutzwert jeder Alternative durch Vergleich der Kriterienwerte gleicher Natur zwischen allen Alternativen ermittelt. Die gängigsten klassischen und Outranking-Methoden werden in Abschnitt B im Detail vorgestellt.

| Multi-Criteria Decision Making<br>(MCDM)                         |   |                    |
|--|---|--------------------|
| Multi-Objective Decision Making (MODM)<br>(stetiger Lösungsraum) | Multi-Attribute Decision Making (MADM)<br>(diskreter Lösungsraum) |                    |
| Vektoroptimierung  | <b>klassische</b>   | <b>Outranking-</b> |
| Zielprogrammierung   | <b>Methoden</b>   | <b>Methoden</b>    |
|  | WSM   | ELECTRE            |
|  | WPM   | PROMETHEE          |
|  | AHP   |                    |
|  | VIKOR   |                    |
|  | GRA   |                    |
|  | TOPSIS  |                    |

Tabelle 2.6: Klassifikationsschema für MCDM-Methoden nach [GeLe14]

## 2.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Überblick über das Themengebiet MCDM gegeben. Bei MCDM handelt es sich um einen Prozess, der als Hilfswerk für komplexe Entscheidungsprobleme dient. Der MCDM-Prozess definiert logische Komponenten und bringt sie in eine hierarchische Struktur. Einer der zentralen Bausteine des MCDM-Prozesses ist die Entscheidungsmatrix. Die Entscheidungsmatrix setzt sich aus Alternativen und Kriterienwerten zusammen und gilt als eine anschauliche und praktische Art der Präsentation der Entscheidungsprobleme. Anhand der Entscheidungsmatrizen lassen sich mehrere Schritte des MCDM-Prozesses beschreiben.

Eine wichtige Komponente des MCDM-Prozesses ist der Satz an Kriterien. Die Kriterien sind die Charakteristiken der Alternativen, mit deren Hilfe Gesamtnutzwerte für alle Alternativen berechnet werden können. Mit den Kriterien hängen zwei Schritte des MCDM-Prozesses eng zusammen. Der erste Schritt ist die Normierung der Kriterienwerte und der Zweite ist die relative Priorisierung der Kriterien. Für diese beide Schritte existieren mehrere Techniken. Für die Normierung kann die absolute Max-Min-Normierung durch die eingebaute Vermeidung der Rankingabnormalität hervorgehoben werden. Die populärste Technik für die Normierung ist AHP.

Ein weiterer wichtiger Schritt des MCDM-Prozesses ist die Alternativenbewertung. Dafür werden verschiedene MCDM-Methoden, auch MCDM-Rankingalgorithmen genannt, benutzt. Zu den bekanntesten MCDM-Methoden können die Folgenden zugerechnet werden: WSM, WPM, TOPSIS, GRA, VIKOR und AHP. Diese MCDM-Methoden werden in Anhang B im Detail beschrieben.

Im nächsten Kapitel werden Entscheidungsalgorithmen für multikriteriellen Hand-over vorgestellt, die auf den Ideen von MCDM aufbauen.



## 3 Entscheidungstechniken für multikriteriellen Handover

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das Themengebiet der Entscheidungstechniken und -algorithmen für den multikriteriellen Handover in modernen mobilen Kommunikationsnetzen. In Abschnitt 3.1 werden zentrale Aspekte des Handovers und die Motivation für den multikriteriellen Handover vorgestellt. Abschnitt 3.2 präsentiert die Ergebnisse der Recherche über Entscheidungstechniken und -algorithmen für den multikriteriellen Handover. Dabei werden die Techniken betrachtet, die auf den in Kapitel 2 beschriebenen MCDM aufbauen. Im Fokus des Abschnittes liegen die Kriterien und mit ihnen zusammenhängende Aufgaben wie die Identifizierung der relevanten Kriterien, die Messung und Übertragung der Kriterienwerte, die Priorisierung und Normierung. In Abschnitt 3.4 werden Studien über die Strukturierung von Eingangsdaten für die Handoverentscheidungsphase vorgestellt.

### 3.1 Einführung

In Mobilfunknetzen wird der Vorgang des Wechsels einer aktiven Kommunikationssitzung zwischen den Zellen als Handover oder auch Handoff bezeichnet. Die Hauptmotivation für ein Handover ist die Sicherstellung einer unterbrechungsfreien Mobilität der Dienste für die mobilen Nutzer. Der Handover ist heutzutage eine unentbehrliche Funktionalität in den modernen Mobilfunknetzen GSM, UMTS, LTE und ist gleichermaßen wichtig für die drahtlosen Netzwerktechnologien WLAN und WiMAX. Der Handover wurde für die Mobilfunknetze GSM, UMTS und LTE von Anfang an im Standard [00916] verankert. Die Technologien wie WLAN und WiMAX dagegen wurden mit Handover-Funktionalitäten im Nachhinein erweitert und jeweils in den Standards [IEEE08] und [IEEE09b] spezifiziert. Die Entscheidungstechniken für die spezifizierten Handover für die oben genannten Technologien basieren hauptsächlich nur auf einem Kriterium, nämlich der Empfangssignalstärke.

Der Handover-Vorgang lässt sich in drei folgende Phasen unterteilen:

- Handoverinitiierung (*engl. handover initiation*) – eine Suche nach verfügbaren Kommunikationswegen und Sammeln der für Handover relevanten Charakteristiken von Netzwerk, Endgerät und Anwendungen,
- Handoverentscheidung (*engl. handover decision*) – eine Bewertung der alternativen Kommunikationswege und Bestimmung des besten Kommunikationsweges,
- Handoverausführung (*engl. handover execution*) – eine Umleitung der aktiven Kommunikationssitzung auf den neuen gewählten Kommunikationsweg.

Der Handover lässt sich nach verschiedenen Attributen klassifizieren. In Tabelle 3.1 ist ein Handover-Klassifizierungsschema vorgestellt.

| Klassifikationsattribut | Handovertyp            | Deutung  |
|-------------------------|------------------------|--|
| Netzwerktyp             | horizontal             | innerhalb der gleichen Technologie                                       |
|                         | vertikal               | die Umschaltung auf eine andere Technologie, z.B.: aus dem WLAN ins UMTS |
| Umschaltung-Strategie   | hard                   | mit einem möglichen Abbruch der aktiven Sitzung                          |
|                         | soft                   | mit Aufrechterhaltung der aktiven Sitzung                                |
| Administrative Domäne   | intra                  | z.B.: innerhalb des o2-Netzes  |
|                         | inter                  | z.B.: aus dem o2-Netz ins Vodafone-Netz                                  |
| Kontrolle des Nutzers   | proaktiv               | Nutzerpräferenzen sind in die Handoverentscheidung involviert            |
|                         | passiv                 | Nutzerpräferenzen sind in die Handoverentscheidung nicht involviert      |
| Handover-Notwendigkeit  | optional               | nicht notwendig für die Aufrechterhaltung der aktiven Sitzung            |
|                         | obligatorisch          | notwendig für die Aufrechterhaltung der aktiven Sitzung                  |
| Entscheidungsinstanz    | Endgeräte-basierend    | die Handoverentscheidung auf dem Endgerät                                |
|                         | Endgeräte-assistierend | die Handoverentscheidung mit Einbeziehung des Endgerätes                 |
|                         | Kernnetz-basierend     | die Handoverentscheidung auf einer Instanz im Kernnetz                   |

Tabelle 3.1: Klassifizierung des Handovers nach [NaHH06]

An Handover für moderne mobile heterogene Netze werden nach [NaHH06] folgende Anforderungen gestellt:

- Zuverlässigkeit hinsichtlich Einhaltung der QoS-Mindestanforderungen nach dem Handover,
- Unterbrechungsfreiheit (nahtlose Umschaltung),
- Vermeidung der Interferenz,
- Lastverteilung,



- Minimierung der Handover-Anzahl.

Für die Performanzbewertung des Handovers sind in [BhKV14] folgende Metriken vorgeschlagen:

- Handover-Verzögerung: Dabei geht es um eine Zeitspanne zwischen der Initiierung und Abschluss des Handovers.
- Handover-Anzahl: Es wird angestrebt, die Handover-Anzahl zu minimieren.
- Die Rate der misslungenen Handover-Versuche: Zu einem misslungenen Handover kommt es, wenn die Ressourcen der Ziel-Basisstation, die am Anfang des Handoverprozesses verfügbar waren, nach der Handoverausführung nicht mehr vorhanden sind.
- Verfügbare Bitrate: die verfügbare Bitrate auf der Ziel-Basisstation nach der Handoverausführung.

Zusätzlich zu diesen Metriken können auch die Entscheidungskriterien des Handover-Entscheidungsalgorithmus als Performanz-Metriken verwendet werden.

Im Zuge des neuen Trends *Next Generation Network* (NGN) hat der sogenannte „vertikaler Handover“ an Aktualität stark gewonnen. Bei NGN geht es um eine Verschmelzung von verschiedenen Kommunikationstechnologien zu einem Netz. Dabei spricht man von einem heterogenen Netz. Bei NGN werden die heutigen Kommunikationsnetze als Zugangsnetze (*engl. access networks*) zu dem IP-basierten NGN-Kernnetz betrachtet, zwischen denen die Endgeräte nahtlos umschalten können sollen. Ein solcher Handover zwischen den unterschiedlichen Technologien wird als vertikaler Handover bezeichnet.

IEEE adressiert das Thema des vertikalen Handovers im Standard IEEE 802.21 „*Media Independent Handover (MIH) Services*“ [rec:08]. Zentraler Bestandteil von IEEE 802.21 MIH ist eine Reihe der sogenannten *Media Independent Handover Function* (MIHF)-Services. MIHF-Services sind universelle netzwerktechnologieübergreifende Netzwerkcharakteristiken. Der Standard enthält die Übersetzungstabellen für die Netzwerkcharakteristiken für Technologien wie Ethernet, WLAN, WiMAX und Mobilfunknetzen wie GSM und UMTS in die MIHF-Services. MIHF-Services ermöglichen einen netzwerktechnologieübergreifenden vertikalen Handover. Außerdem beschreibt der Standard die Komponenten für das Sammeln und den Transport der Netzwerkcharakteristiken, die in mobilen Endgeräten, in Netzwerkknotten und im Kernnetz zu platzieren sind.

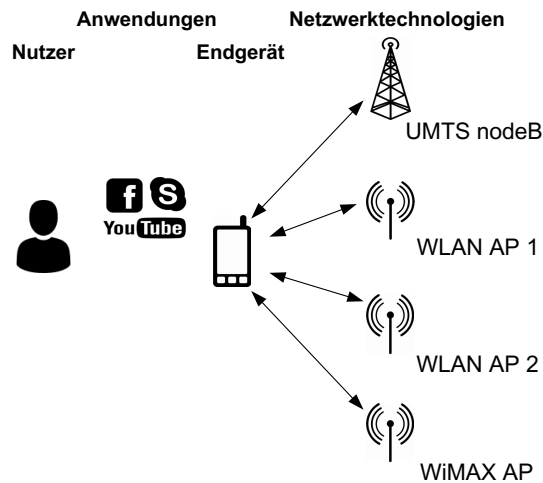


Abbildung 3.1: Nutzer im modernen mobilen heterogenen Kommunikationsumfeld.

Ein Themengebiet aus dem Bereich des Handovers bilden multikriteriellen Entscheidungstechniken und -algorithmen für den vertikalen Handover. Die Motivation für die multikriteriellen Entscheidungstechniken und -algorithmen wird anhand Abbildung 3.1 dargestellt. Diese Abbildung veranschaulicht die heutige Lage in den mobilen heterogenen Kommunikationsnetzen mit einer Reihe verschiedener Netzwerktechnologien wie UMTS, WiMAX und WLAN. Der dargestellte Nutzer verwendet ein Smartphone, das mit Schnittstellen für UMTS, WLAN, WiMAX ausgestattet ist. In diesem Szenario stehen dem Nutzer vier alternative Kommunikationswege zur Verfügung. Weiterhin sind auf dem Smartphone verschiedene Anwendungen aktiv. Somit lassen sich vier Interessendomänen bilden: Nutzer, Anwendungen, Netze, Endgerät. Sie werden hier Interessensdomänen genannt, da jede dieser Domäne ihre Interessen oder Ziele haben kann, wie zum Beispiel:

- Nutzer – Präferenzen hinsichtlich QoS, Sicherheit, Kosten etc.,
- Anwendung – Anforderungen hinsichtlich QoS und Sicherheit,
- Endgerät – Minimierung des Stromverbrauches,
- Netz – effiziente Ressourcenauslastung.

Um diesen Zielen bei einer Handoverentscheidung gerecht zu werden, ist die Empfangssignalstärke als Entscheidungskriterium allein nicht ausreichend. Es müssen mehrere, für die Ziele relevante Kriterien bei der Handoverentscheidung berücksichtigt werden. Die Flexibilität bei der Konfiguration ist ebenfalls eine Anforderung an multikriterielle Entscheidungsalgorithmen. Dabei geht es um die Werkzeuge für den Nutzer oder den Systemadministrator zur Konfiguration der für die Entscheidungsphase relevanten Informationen. Des Weiteren ist die Adaptivität der Entscheidungsalgorithmen an verschiedene Szenarien als Anforderung anzusehen. Ein Szenario kann sich aus

mehreren „Dimensionen“ wie zum Beispiel den Typen der aktiven Anwendungen, Mobilitätsmuster, Aufenthaltsort, Akkustand des Endgerätes, Uhrzeit und Datum etc. zusammensetzen. Unter der Adaptivität wird eine Anpassung des Entscheidungsalgorithmus an jeweiliges Szenario durch entsprechende Auswahl und Parametrierung der Entscheidungskriterien verstanden. Darüber hinaus sollte Anwendungssensitivität sichergestellt werden. Dabei geht es um eine Anpassung der Entscheidungsalgorithmen in Abhängigkeit von Anforderungen der aktiven Anwendungen.

Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit der Klassifikation und der Analyse der existierenden multikriteriellen Entscheidungstechniken für den vertikalen Handover.

## 3.2 Gruppen von Entscheidungstechniken für multikriterielle Handover

In den letzten Jahren wurde eine beträchtliche Menge an multikriteriellen Entscheidungstechniken für den vertikalen Handover für heterogene Netze in wissenschaftlichen Studien vorgeschlagen. Ein guter Überblick über den Stand der Forschung über das Thema der multikriteriellen Entscheidungstechniken ist in [ChRBVK13], [KaKP08], [MBCCM11] und [AhBG14] gegeben. Die existierenden Entscheidungstechniken lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

1. Nutzerzentrisch,
2. Kontextsensitiv,
3. Basierend auf MCDM-Methoden,
4. Basierend auf Fuzzy-Logik,
5. Basierend auf Spieltheorie,
6. Basierend auf künstlichen neuronalen Netzen.

In folgenden Abschnitten werden die ersten drei Gruppen und dazugehörige Lösungen beschrieben. Die Entscheidungstechniken auf Basis von Fuzzy-Logik [VMMK11], Spieltheorie [FLLJ14] und künstlichen neuronalen Netzen [LiWL08] werden in dieser Arbeit aus folgenden Gründen nicht betrachtet. Diese Entscheidungstechniken bestehen aus den gleichen Schritten wie MCDM-basierte Entscheidungstechniken, nämlich Normierung, Priorisierung und Alternativenbewertung. Der einzige prinzipielle Unterschied besteht dabei in der Verwendung einer spezifischen Methode für die Alternativenbewertung. Der Fokus dieser Arbeit liegt nicht auf dem Vergleich

und Gegenüberstellung von nicht MCDM-basierten Techniken für die Alternativenbewertung. Deshalb werden diese drei Methoden nicht weiter untersucht. Es besteht allerdings die Möglichkeit, diese Methoden in dem in Kapitel 5 vorgeschlagen Framework zu integrieren.

### 3.2.1 Nutzerzentrische Entscheidungstechnik

Im Fokus der nutzerzentrischen Entscheidungstechniken liegen verschiedene Nutzerpräferenzen hinsichtlich bestimmter Kriterien. Im Folgenden werden zwei nutzerzentrische Entscheidungsalgorithmen exemplarisch erläutert.

Die zentrale Komponente des Systems aus [CaDM04] ist ein Benutzerprofilemanagementmodul, in welchem der Nutzer seine Handover-Strategien formulieren kann. Eine Handover-Strategie kann wie folgt formuliert werden: Finde einen Kompromiss zwischen Kostenminimierung und Aufrechterhaltung der Sitzung. Die Handoverentscheidung wird in einem weiteren Modul basierend auf den Charakteristiken der verfügbaren Kommunikationswege und Nutzerpräferenzen getroffen. Die Studie enthält keine detaillierte Beschreibung der Bewertung der alternativen Kommunikationswege im Rahmen der Handoverentscheidung.

In [NVAGD08] wird ein Handover-Entscheidungsalgorithmus für die Optimierung des Stromverbrauches basierend auf folgenden Entscheidungskriterien vorgestellt: Kosten, RSS, SINR, Geschwindigkeit des Endgerätes, Akkustand, Stromverbrauch und Netzwerklast. Der Ansatz beinhaltet eine GUI, über die die Nutzerpräferenzen in Form eines Gewichtsvektors für Kriterien zweier Profile wie Echtzeitprofil für Echtzeitanwendungen und Nicht-Echtzeitprofil für Nicht-Echtzeitanwendungen konfiguriert werden können. Die Kriterienwerte werden dabei mittels einer sigmoidalen Nutzenfunktion normiert. Für die Bewertung der Alternativen wird die MCDM-Methode WPM eingesetzt.

### 3.2.2 Kontextsensitive Entscheidungstechnik

Bei der kontextsensitiven Entscheidungstechnik wird der Akzent auf die Kontextinformationen gelegt. Unter den Kontextinformationen werden die Charakteristiken verschiedener für die Handoverentscheidung relevanten Instanzen oder Domänen wie Netzwerk, Endgerät, Nutzer oder Anwendung verstanden. Im Folgenden werden zwei kontextsensitive Algorithmen kurz vorgestellt.

In [AhKL06] werden folgende Informationen als Kontext für die Entscheidungsphase betrachtet:

- QoS-Charakteristiken und monetäre Kosten der Netze, Charakteristiken des Endgerätes wie Bildschirmauflösung, Akkustand etc.,
- Anwendungsanforderungen hinsichtlich QoS-Charakteristiken und Nutzerpräferenzen hinsichtlich Priorisierung der Netzwerkschnittstellen.

Die Anwendungen werden dabei in drei Klassen unterteilt. Vom Nutzer des Systems werden die QoS-Mindestanforderungen und die Netzwerkprioritäten für jede Anwendungsklasse gesetzt. Während der Entscheidungsphase werden zuerst die zulässigen Alternativen anhand der Mindestanforderungen ermittelt. Danach wird die beste Alternative mittels AHP bestimmt.

In [ZeBD10] ist ein Algorithmus vorgeschlagen, bei dem eine umfangreiche Menge an Kontextinformationen während der Handoverentscheidung berücksichtigt wird. Dabei geht es bei Kontextinformationen einerseits um die netzwerkbezogenen QoS-Charakteristiken und andererseits um nutzer- und anwendungsbezogene Präferenzen und Anforderungen. Diese Kontextinformationen werden als Entscheidungskriterien verwendet. Die Entscheidungskriterien werden mittels AHP priorisiert. Die nutzer- und anwendungsbezogenen Anforderungen werden für die Bestimmung zulässiger Alternativen benutzt. Die netzwerkbezogene QoS-Charakteristiken werden für die WSM-basierte Bewertung der Alternativen verwendet.

### 3.2.3 Entscheidungstechnik auf Basis von MCDM-Methoden

In diesem Abschnitt werden Handover-Entscheidungsalgorithmen basierend auf MCDM-Methoden wie WSM, WPM, TOPSIS, GRA, VIKOR, AHP und ELECTRE untersucht.

Die MCDM-basierten Handover-Entscheidungsalgorithmen für vertikalen Handover sind in ihrem Aufbau ähnlich und unterscheiden sich in nur wenigen Merkmalen. Das macht eine Auflistung der Algorithmen in Tabelle 3.2 sinnvoll. Alle Algorithmen nutzen verschiedene Entscheidungskriterien. In den meisten Fällen geht es dabei einerseits um die Charakteristiken der Kommunikationswege QoS-Merkmale und Sicherheit, andererseits wird das Kriterium Kosten in vielen Algorithmen in die Entscheidung einbezogen. Für die Priorisierungsphase kommen Techniken wie AHP und entropiebasierte Priorisierung zum Einsatz. Für die Normierung werden unterschiedliche Methoden eingesetzt. Wobei in den meisten Fällen die Standardnormierungstechnik der jeweiligen MCDM-Methode benutzt wird. Die Autoren der Algorithmen verwenden unterschiedliche Metriken für die Evaluierung der Algorithmen.

Der Ansatz aus [TaPS08] aus Tabelle 3.2 weist einige Besonderheiten auf. Die Priorisierung der Kriterien ist in diesem Algorithmus nicht erwähnt. Außerdem werden

| MCDM-Methoden           | Entscheidungskriterien  | Priorisierung | Normierung   | Evaluierungsmetriken  | Quelle           |
|-------------------------|---|---------------|--|---|------------------|
| WSM                     | Verf. Bitrate, Paketverlustrate, Kosten   |               |  | Handover-Verzögerung, Rate der erfolgreichen Handovers, Durchsatz | [TaPS08]         |
| WSM                     | Empfangssignalstärke, Maximale Bitrate, Verzögerung, Kosten, Sicherheit, Stromverbrauch   |               | Max-Normierung   | Empfangene Datenmenge, Datendurchsatz                             | [Ever11]         |
| GRA                     | Durchsatz, Verzögerung, Reaktionszeit, Jitter, Bitfehlerrate, Burstfehlerrate, Paketwiederholungsrate, Paketverlustrate, Sicherheit, Kosten | AHP           | Max-Min-Normierung   | GRC   | [SoJa04, SoJa05] |
| TOPSIS                  | SINR, erforderliche Bitrate, verf. Bitrate, Kosten,   | Entropie, AHP | Vektornormierung   | Handover-Anzahl, Durchsatz  | [SMSMH10]        |
| WSM, WPM, TOPSIS        | Verzögerung, Jitter, verfügbare Bitrate, Paketverlustrate, Kosten   |               | Vektornormierung   | Rank Reversal, Handover-Anzahl                                    | [TrBo08]         |
| VIKOR, WSM, WPM, TOPSIS | Verzögerung, Jitter, verfügbare Bitrate, Bitfehlerrate  | AHP           | Vektornormierung (VIKOR), Max-Normierung (WSM), keine (WPM), Vektornormierung (TOPSIS) | Verzögerung, Paketverlustrate                                     | [MaMD16]         |
| VIKOR, WSM, TOPSIS      | Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate, verfügbare Bitrate, maximale Bitrate, Kosten   |               | Vektornormierung (VIKOR), Max-Normierung (WSM), Vektornormierung (TOPSIS)              | Jitter, verfügbare Bitrate  | [GMPRSN09]       |
| ELECTRE                 | Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate, verfügbare Bitrate, maximale Bitrate, Kosten   |               | Max-Min-Normierung   | Entscheidungskriterien  | [BaLe07]         |
| WSM, WPM, TOPSIS, GRA   | Verzögerung, Paketverlustrate, Kosten, Sicherheit   | AHP           |  | Verzögerung, Kosten   | [LBHB08]         |

Tabelle 3.2: MCDM-basierte Handover-Entscheidungsalgorithmen

die Kriterienwerte nicht normiert, was die Korrektheit des beschriebenen Ansatzes infrage stellt. Eine weitere Arbeit aus Tabelle 3.2, die eine besondere Aufmerksamkeit verdient, ist [Ever11]. Hier wurde eine Handover-Middleware namens REACH vorgeschlagen, die einen multikriteriellen Handover-Entscheidungsalgorithmus enthält. Im Gegensatz zu den anderen Handover-Entscheidungsalgorithmen aus Tabelle 3.2, lässt sich der Handover-Entscheidungsalgorithmus von REACH über eine GUI konfigurieren, indem eine Zielsetzung für den Handover gewählt wird. Im REACH wurden Zielsetzungen wie konfigurierte Priorität der Netzzugangsschnittstellen, Maximierung der Bitrate, Minimierung der Verzögerung, Minimierung der Kosten, Mobilität, Sicherheit und Stromverbrauch implementiert. REACH vereinfacht die Konfiguration der Entscheidungsphase für den Nutzer, da statt einer relativ komplexen Auswahl und Parametrierung der Entscheidungskriterien nur eine Zielsetzung gewählt werden muss.

Es gibt Studien, die sich mit dem Vergleich der MCDM-basierten multikriteriellen Algorithmen für den vertikalen Handover beschäftigen. So wurden in [MMPRSN10] Algorithmen WSM, WPM, TOPSIS, ELECTRE, VIKOR und GRA numerisch in MATLAB untersucht und verglichen. Sechs Alternativen basierend auf UMTS, WLAN und WiMAX wurden simuliert. Die besten Alternativen wurden unter Berücksichtigung der Kriterien wie verfügbare Bitrate, maximale Bitrate, Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate und Kosten berechnet. Aus den Analyseergebnissen folgt, dass sich die Algorithmen auf Basis von WSM, VIKOR und TOPSIS am besten für die Echtzeitanwendungen eignen, da ihre Ergebnisse bessere Werten hinsichtlich Verzögerung und Jitter erzielt haben. Dagegen sind GRA und WPM die Methoden der Wahl für bitratenintensive Anwendungen, da diese beide Methoden Ergebnisse mit besseren verfügbaren Bitraten geliefert haben.

In [SNMMPR12] wurde die Analyse aus [MMPRSN10] mit drei Wichtungsklassen für die Kriterien erweitert. Beim ersten Typ wurden die Paketverzögerung und Jitter, beim zweiten Typ verfügbare Bitrate und maximale Bitrate und beim dritten Typ Kosten pro Byte hoch priorisiert. Die restlichen Kriterien wurden bei allen drei Typen gleichmäßig gewichtet. Der erste Typ ist für den Echtzeitdatenverkehr, der zweite für den bitratenintensiven Datenverkehr und der dritte für einen kostensparenden Modus vorgesehen. Für jeden Typ wurden fünfzig Handover-Entscheidungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation sind in Bezug auf die Eignung der Handover-Algorithmen für bestimmte Wichtungsklassen analysiert worden. Außerdem wurden die Rechenkomplexität der MCDM-Methoden anhand von Gleitkommaoperationen pro Sekunde (engl. *Floating Point Operations per Second* (FLOPS)) gemessen. Die Analyseergebnisse hinsichtlich Wichtungsklassen und Rechenkomplexität sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

| MCDM-Methode | Echtzeit-<br>datenverkehr | bitratenintensiver<br>Datenverkehr | kostensparender<br>Modus | FLOPS        |
|--------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------|
| WSM          | befriedigend              | befriedigend                       | sehr gut                 | sehr gut     |
| WPM          | schlecht                  | sehr gut                           | sehr gut                 | befriedigend |
| TOPSIS       | befriedigend              | befriedigend                       | sehr gut                 | befriedigend |
| GRA          | schlecht                  | schlecht                           | schlecht                 | sehr gut     |
| VIKOR        | sehr gut                  | befriedigend                       | sehr gut                 | befriedigend |
| ELECTRE      | schlecht                  | befriedigend                       | befriedigend             | schlecht     |

Tabelle 3.3: Bewertungsergebnisse der Anwendung der MCDM-Methoden für Handover-Entscheidungsalgorithmen aus [SNMMPR12]

In [Silk13] wurden die Handover-Entscheidungsalgorithmen basierend auf MCDA-Methoden wie WSM, WPM und TOPSIS untersucht und verglichen. Die Autoren haben drei alternativen Kommunikationswege auf Basis von UMTS, WLAN und WiMAX betrachtet. Während Simulation wurden Kriterien wie verfügbare Bitrate, maximale Bitrate, Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate und Kosten berücksichtigt. Dabei kamen folgende Verkehrsmodi definiert über Wichtungsklassen zum Einsatz: Basismodus mit gleichpriorisierten Kriterien, Echtzeitmodus mit hoch priorisierten Verzögerung und Jitter, bitratenintensiver Modus mit hoch priorisierten verfügbarer und maximaler Bitrate. Laut Aussage der Autoren zeigten die Simulationen ähnliche Ergebnisse für alle drei Entscheidungsalgorithmen.

In [KaJe12] wurde ein Vergleich der MCDM-Methoden wie WSM, WPM, GRA und TOPSIS anhand der Kriterien Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate und verfügbare Bitrate für vier QoS-Klassen durchgeführt. WSM, GRA und TOPSIS zeigten ähnliche Ergebnisse. WPM lieferte die besten Alternativen mit schlechteren Kriterienwerten im Vergleich zu WSM, GRA und TOPSIS.

Die vier oben beschriebenen Vergleichsstudien der MCDM-basierten Handover-Entscheidungsalgorithmen liefern zusammenfassend widersprüchliche Ergebnisse.

### 3.2.4 Zusammenfassung

Durchgeführte Analyse der nutzerorientierten, kontextsensitiven und MCDM-basierten Entscheidungstechniken führt deren Ähnlichkeit deutlich vor Augen. Der Unterschied dieser Entscheidungstechniken zu den MCDM-basierten Entscheidungstechniken besteht im Fokus. Bei nutzerorientierten Entscheidungstechniken liegt der Fokus auf den Nutzerpräferenzen und im Falle der kontextsensitiven Entscheidungstechniken auf dem Kontext, bei dem eine umfangreiche Menge an Charakteristiken unterschiedlicher Natur verschiedener Domänen gemeint wird. Ansonsten sind die Algorithmen beider Gruppen nach dem gleichen Prinzip wie die Algorithmen der MCDM-basierten Gruppe aufgebaut und nutzen die gleichen Methoden für die Priorisierung der Kriterien und Bewertung der Alternativen. Auf der anderen Seite ist jeder MCDM-



basierte Entscheidungsalgorithmus durch die Berücksichtigung der Nutzerpräferenzen durch Kriterienpriorisierung und durch die Berücksichtigung der Kriterien prinzipiell nutzerorientiert und kontextsensitiv.

Ansonsten sind die existierenden Algorithmen für eine feste Anzahl an vorkonfigurierten Kriterien ausgelegt. Somit ist eine Flexibilität hinsichtlich der Konfiguration der Entscheidungsphase nicht gegeben. Die Flexibilität wurde offensichtlich während der Entwicklung dieser Algorithmen nicht betrachtet. Es wäre theoretisch möglich, die Algorithmen mit einer Konfigurationsinstanz zu erweitern, die dann die Konfigurationsflexibilität erbringen würde.

Weiterhin wird die Anwendungssensitivität in manchen Lösungen durch die Priorisierung der Kriterien pro Anwendungstyp adressiert. Allerdings wird die Priorisierung der Kriterien pro Anwendung nicht betrachtet. Auch Fälle mit mehreren gleichzeitig aktiven Anwendungen unterschiedlicher Anwendungstypen werden nicht betrachtet.

### 3.3 Kriterien für Handoverentscheidung

In Abschnitt 2.3 wurde das Thema der Kriterien für MCDM behandelt. In dem vorliegenden Unterkapitel geht es um die Kriterien für multikriterielle Handover-Entscheidungsalgorithmen.

Eine der ersten Herausforderungen beim Entwurf eines Handover-Entscheidungsalgorithmus ist die Identifizierung relevanter Informationen oder Kriterien. In Studien [AhKL06], [ZeBD10] und [ADBD<sup>+</sup>99] ist dabei die Rede von Kontextinformationen. Die Autoren von [ADBD<sup>+</sup>99] schlagen folgende Definition für den Kontext vor: „*Context is any information that can be used to characterize the situation of an entity. An entity is a person, place, or object that is considered relevant to the interaction between a user and an application, including the user and applications themselves.*“ Je nach gelegtem Fokus kann es bei einer Handoverentscheidung sinnvoll sein, die Charakteristiken von verschiedenen im Handover-Vorgang involvierter Domänen einzubeziehen. Diese Domänen sind nach [ChRBVK13] Zugangsnetze, Endgeräte, Anwendungen und Nutzer. Auch die Charakteristiken des Handover-Vorganges wie zum Beispiel historische Daten der Handover-Verzögerung oder der Rate von erfolgreichen Handovers können in die Handoverentscheidung einfließen. In manchen Fällen ist es sinnvoll, auch sogenannte externe Umgebungsfaktoren wie zum Beispiel Zeit und Datum zu berücksichtigen.

Die Charakteristiken verschiedener Domänen, die als Entscheidungskriterien nutzbar sind, wurden in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Ein Teil der Klassifikationsattribute der Kriterien wurden aus [BHSW07] und [MBCCM11] übernommen.

| Kriteriumname                                    | Domäne  | Gruppe            | Einfluss auf den Nutzwert         |
|--|---|-------------------|-----------------------------------|
|  | (Netzwerk, Anwendung, Endgerät, Nutzer, Handover-Algorithmus, externe Umgebung) | (QoS, Sicherheit) | (Wertekriterium, Kostenkriterium) |
| Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)                   | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Signal-Interferenz-Rausch-Verhältnis (SINR)      | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Bitfehlerrate                                    | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Burstfehler                                      | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Paketfehlerrate                                  | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Verzögerung                                      | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Verzögerungsschwankung/Jitter                    | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Paketverlustrate                                 | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Paketwiederholungsrate                           | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Paketdopplungsrate                               | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Paketneuordnungsrate                             | Netzwerk  | QoS               | Kostenkriterium                   |
| Maximale Bitrate                                 | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Verfügbare Bitrate                               | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Durchsatz  | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Verfügbarkeit                                    | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Dienstverfügbarkeit                              | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Netzwerkverbindungsdauer                         | Netzwerk  | QoS               | Wertekriterium                    |
| Nutzerpräferenz                                  | Netzwerk  |                   | Wertekriterium                    |
| Stromverbrauch                                   | Netzwerk  |                   | Kostenkriterium                   |
| Distanz zum mobilen Endgerät                     | Netzwerk  |                   | Kostenkriterium                   |
| Monetäre Kosten                                  | Netzwerk  |                   | Kostenkriterium                   |
| Verschlüsselung                                  | Netzwerk  | Sicherheit        | Wertekriterium                    |
| Authentifizierung                                | Netzwerk  | Sicherheit        | Wertekriterium                    |
| Integrität                                       | Netzwerk  | Sicherheit        | Wertekriterium                    |
| Geschwindigkeit                                  | Endgerät  |                   |                                   |
| Standort   | Endgerät  |                   |                                   |
| Akkustand  | Endgerät  |                   | Wertekriterium                    |
| Verkehrslast                                     | Endgerät  |                   | Kostenkriterium                   |
| Stromverbrauch                                   | Anwendung   |                   | Kostenkriterium                   |
| Bitratenverbrauch                                | Anwendung   |                   | Kostenkriterium                   |
| Anforderungen (QoS, Sicherheit, ...)             | Anwendung   |                   |                                   |
| Anforderungen (QoS, Sicherheit, monetäre Kosten) | Nutzer  |                   |                                   |
| Netzwerkpräferenz                                | Nutzer  |                   |                                   |
| Zeit, Datum                                      | Ext. Umgebung   |                   |                                   |
| Handover-Anzahl                                  | Handover-Algorithmus  |                   | Kostenkriterium                   |
| Handover-Verzögerung                             | Handover-Algorithmus  |                   | Kostenkriterium                   |
| Rate von erfolgreichen Handovers                 | Handover-Algorithmus  |                   | Wertekriterium                    |
| Paketverlustrate beim Handover                   | Handover-Algorithmus  |                   | Kostenkriterium                   |

Tabelle 3.4: Kriterien für Handoverentscheidung für mobile Kommunikationsnetze

Weiterer Aspekt des Handover-Vorganges ist die Messung und der Transport der Kriterienwerte. Die Ermittlung der Kriterienwerte steht nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Nichtsdestotrotz werden einige Ansätze vorgestellt, um prinzipielle Möglichkeiten der Messung und des Transports der Kriterien zu zeigen.

Der Standard IEEE 802.21 [rec:08] definiert Protokolle für die Anfrage und den Transport von Netzwerkcharakteristiken. Der Standard bietet aber keine Methoden für die Messung der Kriterienwerte an. Der RFC 2330 [PAMM98] behandelt die Metriken auf der ISO/OSI-Vermittlungsschicht. In diesem Standard werden die Anforderung an die Metriken gestellt, die Messverfahren beschreiben und die Arten der Zusammensetzung der Kriterienwerte eines Kommunikationspfades betrachtet. Die Empfehlung ITU Y.1540 [ITU-11] schlägt eine Reihe von Metriken für die ISO/OSI-Vermittlungsschicht inklusive ihrer Messverfahren vor. In der Arbeit [Bü13] wurden die Netzwerkmetriken wie Datenraten, Verzögerung, Paketverlustraten und Neuordnungsraten untersucht. Die Messverfahren für diese Metriken wurden analysiert. Im Standard 3GPP TS 23.107 [10711] wird eine QoS-Architektur und QoS-Attributen für die modernen Kommunikationsnetze spezifiziert.

Ein weiteres kriterienbezogenes Thema ist die Priorisierung. Die Kriterienpriorisierung in den existierenden Handover-Algorithmen wird einerseits dazu verwendet, dem Nutzer die Möglichkeit zu geben, die für ihn wichtigen Kriterien hervorzuheben. Andererseits wird durch die Kriterienpriorisierung eine Handover-Optimierung für die bestimmten Anwendungstypen erzielt. In mehreren vorgeschlagen Handover-Entscheidungsalgorithmen werden folgende Anwendungstypen aus der Spezifikation 3GPP TS 23.107 [10711] betrachtet:

- *Conversational* – Echtzeitkonversationen zwischen zwei oder mehreren Teilnehmern, zum Beispiel Telefonie, Video-Telefonie,
- *Streaming* – Echtzeitdatenflüsse normalerweise mit Menschen als Empfänger, zum Beispiel Audio-, Video-Streaming,
- *Interactive* – eine Mensch zu Maschine Interaktion mit einer Anfrage der Ressourcen, zum Beispiel Web-Browsing, Datenbankabfrage,
- *Background* – eine Maschine zu Maschine Interaktion, zum Beispiel E-Mail, SMS, Download.

Jeder Anwendungstyp hat nach 3GPP TS 23.107 [10711] seine Präferenzen hinsichtlich bestimmter QoS-Parametern. In den meisten existierenden Handover-Entscheidungsalgorithmen wird Kriterienpriorisierung pro Anwendungstyp ohne gründliche Untersuchung und Begründung vorgenommen. Unterdessen ist AHP die am häufigsten verwendete Priorisierungsmethode.

Die Normierung in den existierenden Handover-Entscheidungsalgorithmen wird mittels Normierungstechniken aus der Tabelle 2.5 durchgeführt. Dabei wird meistens von einem linearen Verhalten der Kriterien in den Wertebereichen ausgegangen, was nicht unbedingt bei allen Kriterien der Fall sein muss. Die Normierung ist auch mit Hilfe von Nutzenfunktionen möglich. Die Studie aus [NVGDA08] beschäftigt sich mit der Untersuchung von möglichen Nutzenfunktionen. In dieser Studie wurden folgende Typen der Nutzenfunktionen vorgestellt: lineare Stufenfunktionen, logarithmische, exponentielle und sigmoidale. [NVGDA08] geht auch auf die Parametrierung der Nutzenfunktionen ein. Allerdings schlagen die Autoren keine Nutzenfunktionen für konkrete für den Handover relevanten Kriterien vor. Die durchgeführte Recherche hat keine weiteren Studien zum diesem Thema ergeben.

### 3.4 Strukturierung von Eingangsdaten

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Entscheidungsphase des multikriteriellen Handovers ist die Strukturierung von relevanten Informationen. Dabei geht es um die Erstellung einer Datenstruktur für das Speichern von relevanten Informationen. Dafür müssen die relevanten Informationen in logische Komponenten gegliedert werden. Danach müssen die logischen Komponenten in einen sinnhaften Zusammenhang untereinander gebracht werden. Im Folgenden werden Studien vorgestellt, die sich mit diesem Thema beschäftigt haben.

In [BoHB08] wurde eine Middleware für die Handoverentscheidungsphase namens Ubique vorgeschlagen. Der zentrale Baustein von Ubique ist eine *Profile Data Base* (PDB). Die PDB beinhaltet XML-basierte Profile für Nutzerpräferenzen, Anwendungsanforderungen und Netzwerkcharakteristiken. Allerdings werden die Parameter der Profile nicht vorgestellt. Weiterhin kann aus der Beschreibung der PDB nicht ihr hierarchischer Aufbau gefolgert werden. Somit ist weder eine mehrfache Verwendung von Informationssätzen (wie zum Beispiel Entscheidungskriterien) noch die Gruppierung von Anwendungen möglich. Außerdem sieht Ubique das Definieren von unterschiedlichen Perspektiven (wie eines Nutzers und eines Netzbetreibers) und unterschiedlichen Algorithmen für die Bewertung der Alternativen nicht vor.

In den Studien [SKMa07] und [SKMa09] wurde ein Modell zur Datenspezifikationen für QoS-Verhandlungen vorgeschlagen. Die Autoren dieser Studien haben Datenstrukturen für nutzer-, anwendungs-, diensteanbieter- und netzbetreiberbezogene Informationen definiert. Basierend auf Informationen aus diesen Datenstrukturen werden multimediale Anwendungen hinsichtlich ihres Verbrauches an Netzwerkressourcen an die vorhandenen Netzwerkkapazitäten angepasst. Diese Lösung wurde zwar nicht für den Handover entwickelt, sie enthält aber die Datenstrukturen für die handoverre-

levanten Informationen. Allerdings berücksichtigt dieses Modell nicht alle für eine umfassende Handoverentscheidung notwendigen Informationssätze. So werden Ziele und Nutzenfunktionen in diesem Modell nicht betrachtet.

## 3.5 Kapitelzusammenfassung

Beim Handover geht es um eine Umschaltung eines mobilen Endgerätes zwischen unterschiedlichen Kommunikationswegen. Die Hauptmotivationen für den Handover ist die Gewährleistung einer unterbrechungsfreien Mobilität der Dienste. Besonders der vertikale multikriterielle Handover hat an Aktualität im Zuge der Entwicklung der modernen Kommunikationsnetze in die Richtung der heterogenen Netze gewonnen. Es wird aktiv im Bereich der multikriteriellen Handover-Entscheidungsalgorithmen geforscht. Dabei werden die Charakteristiken verschiedener Domänen wie Nutzer, Anwendung, Endgerät, Netzwerk und externe Umgebung als Entscheidungskriterien betrachtet.

Die multikriteriellen Handover-Entscheidungsalgorithmen werden in den Studien [ChRBVK13], [KaKP08], [MBCCM11] und [AhBG14] nach ihren Schwerpunkten und benutzten Techniken in mehrere Gruppen unterteilt. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Algorithmen aus den Gruppen der nutzerorientierten, der kontextsensitiven und der MCDM-basierten Handover-Entscheidungsalgorithmen. Im Mittelpunkt der nutzerorientierten Algorithmen steht der Nutzer und seine Präferenzen hinsichtlich verschiedener Kriterien. Bei kontextsensitiven Algorithmen handelt es sich um die Verfahren bei denen der Kontext die wichtigste Rollen spielt. Der Kontext bezeichnet eine Menge von Charakteristiken verschiedener Domänen. Die MCDM-basierten Algorithmen bauen auf dem MCDM-Prozess und den MCDM-Methoden auf. Die Unterteilung in diese Gruppen ist keinesfalls rigoros. Es gibt gewisse Überschneidungen zwischen den Gruppen. Einerseits nutzen nutzerorientierte und kontextsensitive Algorithmen die MCDM-Methoden für die Alternativenbewertung. Andererseits sind die Nutzerpräferenzen in Form von Kriteriengewichten und der Kontext in Form von Kriterien die unentbehrlichen Bestandteile jedes MCDM-basierten Algorithmus. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Recherche hat keine tiefgehende Gegenüberstellung der MCDM-basierten Handover-Entscheidungsalgorithmen in Simulationsumgebungen oder in reellen Netzen ergeben. Die durchgeführten Studien zu diesem Thema basieren auf numerischen Untersuchungen, liefern jedoch keine korrelierenden Ergebnisse.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der multikriteriellen Handover-Entscheidungsalgorithmen sind die Kriterien. Wie bereits erwähnt wurde, geht es bei den Kriterien um die Charakteristiken verschiedener Instanzen oder Domänen, die für die Handoverentscheidung von Relevanz sein können. Die Herausforderungen, die im Zusammenhang mit Kriterien entstehen, sind die Identifizierung der relevanten Kriterien für ein bestimmtes Szenario, das Messen und der Transport der Kriterienwerte, die Priorisierung der Kriterien und die Normierung der Kriterienwerte. Eine breite Menge

von Kriterien verschiedener Natur könnte laut Literaturrecherche für den vertikalen Handover-Entscheidungsalgorithmus von Relevanz sein (siehe Tabelle 3.4). Die Standardisierungsgremien wie IEEE, IETF, ITU und 3GPP schlagen etliche Mess- und Transportverfahren für Kriterien vor. Die Untersuchung der Priorisierung und der Normierung in den vorgeschlagenen Handover-Lösungen ist mangelhaft. Es gibt keine allgemeinen Richtlinien für die Priorisierung der Kriterien. Die Priorisierung der Kriterien in existierenden Lösungen geschieht zwar oft mit Hilfe von AHP, aber im Grunde nach dem subjektiven Ermessen der Autoren des jeweiligen Algorithmus.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Strukturierung der relevanten Eingangsdaten und die Erstellung einer Datenstruktur. Die vorhandenen Lösungen berücksichtigen nicht alle Informationssätze, die für eine umfangreiche Konfiguration der Handoverentscheidungsphase nötig sind.

Die für weitere Untersuchungen aufgedeckten unbearbeiteten Themen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- eine Datenstruktur für eine umfangreiche und flexible Konfiguration der Handoverentscheidung,
- schwache Anwendungssensitivität – beschränkte Möglichkeiten für die Parametrierung von für Handoverentscheidung relevanten anwendungsspezifischen Informationssätze, auch für mehrere aktive Anwendungen,
- fehlende Untersuchung der Optimierungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Anwendungsanforderungen,
- nicht ausreichender Vergleich der Anwendung unterschiedlicher MCDM-Methoden.

Die genannten offenen Themen werden in Kapiteln 4 und 5 thematisiert.





## 4 Neuartige Entscheidungsalgorithmen für Handover

In diesem Kapitel werden Optimierungspotentiale auf Basis von Reduzierung der Vergabe von überschüssigen Kapazitäten an die Nutzer während der Entscheidungsphase des Handovers erörtert. In den Abschnitten 4.2 und 4.3 werden zuerst Optimierungspotentiale anhand von Fallstudien aufgedeckt und diskutiert. Danach werden zwei neuartige Entscheidungsalgorithmen vorgeschlagen und vorgestellt. Abschnitt 4.4 befasst sich mit der Evaluierung dieser Entscheidungsalgorithmen.

### 4.1 Einführung

Wie in Kapitel 2 beschrieben wurde, ist die Normierung eine der Phasen im multi-kriteriellen Entscheidungsprozess. In veröffentlichten Handover-Lösungen (siehe Abschnitt 3.2) wird die Normierung oberflächlich betrachtet. Dabei wird die Betrachtung der Normierungsphase auf eine Übersicht der vorhandenen Normierungstechniken beschränkt. Der zentrale Bestandteil der Normierung ist die Nutzenfunktion. Verschiedene Nutzenfunktionen werden in [NVGDA08] analysiert. Studien mit detaillierten Untersuchungen der Einflüsse von diversen Nutzenfunktionen auf die Handoverentscheidung wurden im Rahmen der Recherche nicht gefunden. Da in der Normierungsphase die Transformation von kriterienspezifischen Wertebereichen in einen einheitlichen Wertebereich stattfindet, hat dieser Vorgang einen Einfluss auf den Gesamtnutzwert der Alternativen. Die Anwendung von verschiedenen Normierungstechniken und Nutzenfunktionen kann zu deutlich unterschiedlichen Bewertungen der Alternativen und damit zu unterschiedlichen Handoverentscheidungen führen.

Die Nutzenfunktionen lassen sich in Abhängigkeit von Anwendungsanforderungen hinsichtlich jeweiliger Kriterien verschieden gestalten. Dabei können einige Anwendungen sogenannte *gesättigte Bereiche* im Hinblick auf einige Kriterien (wie z.B. Verzögerung oder verfügbare Bitrate) haben. Mit den gesättigten Bereichen werden Intervalle der Kriterienwerte gemeint, in welchen die Verbesserung des Nutzwertes

nicht mehr nötig ist. Durch die Verwendung der gesättigten Bereiche in Nutzenfunktionen kann die Belegung der überschüssigen Kapazitäten reduziert werden. Gleichzeitig können dadurch die Werte der Kriterien in nicht gesättigten Bereichen verbessert werden. Zusätzlich führt der Einsatz von gesättigten Bereichen zu einer effizienteren Ressourcennutzung des Netzwerkes. Die Kriterien mit gesättigten Bereichen werden im Weiteren als *beschränkte Kriterien* bezeichnet. Die Kriterien ohne gesättigte Bereiche werden *unbeschränkte Kriterien* genannt.

In der vorliegenden Arbeit wird die Normierungsphase im Zusammenhang mit Anwendungsanforderungen auf potenzielle Optimierungsmöglichkeiten hin untersucht. Mittels analytischer Untersuchungen wurden zwei Entscheidungsalgorithmen entworfen.

Der erste Algorithmus namens *Oversaturation Reduction Algorithm* (ORA) ist benutzerorientiert und verbessert Werte der unbeschränkten Kriterien durch die Überschussreduzierung der Werte von beschränkten Kriterien. Die Überschussreduzierung erfolgt unterdessen durch die Optimierung eines Kriteriums nicht im ganzen zulässigen Bereich, sondern nur bis zu einem bestimmten von jeweiliger Anwendung erforderlichen Schwellenwert. Für eine Video-Streaming-Anwendung mit maximal erforderlicher Bitrate von 1 Mbit/s würde der Schwellenwert für das Kriterium verfügbare Bitrate bei 1 Mbit/s liegen. Der zweite Entscheidungsalgorithmus namens *Aggressive Oversaturation Reduction Algorithm* (AORA) betrachtet das Problem des Überschusses aus der Perspektiven sowohl des Benutzers als auch des Netzbetreibers. Hier wird ein Kompromiss zwischen der Überschussreduzierung und der Degradierung der Kriterienwerte in nicht gesättigten Bereichen vorgeschlagen.

In diesem Kapitel werden diese zwei neuartige Entscheidungsalgorithmen im Detail beschrieben. Für jeden Algorithmus wird zuerst eine Motivation anhand ausgewählter Anwendungsfälle vorgestellt und danach der Algorithmus selbst im Detail beschrieben. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse der numerischen Evaluierung vorgestellt und diskutiert.

## 4.2 Optimierung durch Überschussreduzierung

In diesem Abschnitt wird ein Entscheidungsalgorithmus beschrieben, der eine Verbesserung der Werte von unbeschränkten Kriterien durch eine Überschussreduzierung der Werte von beschränkten Kriterien ermöglicht.

### 4.2.1 Problembeschreibung und Motivation

In existierenden Handover-Entscheidungsalgorithmen werden die Kriterien im ganzen zulässigen Bereich (engl. *feasible range*) ihrer Nutzenfunktionen optimiert, was in bestimmten Fällen zu einer ineffizienten Ressourcenbelegung sowohl aus der Nutzerperspektive als auch aus der Sicht des Netzbetreibers führen kann. Das Problem wird im Folgenden an einem Beispielszenario erklärt.

Es wird ein Szenario mit einem mobilen Endgerät mit drei alternativen Kommunikationswegen betrachtet. Es wird angenommen, dass auf dem Endgerät nur eine Nutzeranwendung läuft, und zwar eine Video-Streaming-Anwendung mit einer adaptiven Bitrate im Bereich zwischen 3 und 25 Mbit/s. In die Handoverentscheidung fließen Kriterien wie Verzögerung, verfügbare Bitrate und monetäre Kosten ein. In Tabelle 4.1 ist die Parametrierung dieser Kriterien dargestellt. Laut [10711] spielt die verfügbare Bitrate die wichtigste Rolle für die Video-Streaming-Anwendungen, dementsprechend wurde das höchste Gewicht diesem Kriterium zugewiesen. Die genaue Vergabe der Gewichte für die Kriterien erfolgte vom Autor vorliegender Arbeit nach seinem subjektiven Ermessen. Die Priorisierung der Kriterien in einem realen System muss vom Systemadministrator basierend auf seinem Expertenwissen durchgeführt werden. Die zulässigen Bereiche der Kriterien ergaben sich aus den Anforderungen der betrachteten Video-Streaming-Anwendungen und aus der Annahme, dass Kommunikationswege mit maximal verfügbarer Bitrate von 500 Mbit/s zur Verfügung stehen. Die Nutzenfunktionen wurden nach der absoluten Max-Min-Normierungstechnik aus Tabelle 2.5 in Abschnitt 2.3.2 für die zulässigen Bereiche der Kriterien erstellt.

|                         | Verf. Bitrate     | Verzögerung         | Kosten              |
|-------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Gewicht, %              | 60                | 20                  | 20                  |
| Zulässiger Wertebereich | 3–500, Mbit/s     | 0–150, ms           | 0–100, C/MByte      |
| Nutzenfunktion          | $\frac{x-3}{497}$ | $\frac{150-x}{150}$ | $\frac{100-x}{100}$ |

Tabelle 4.1: Parametrierung der Kriterien

Als Nächstes wurden zwei Entscheidungsmatrizen in Tabellen 4.2 und 4.3 mit drei Kommunikationswegen und Beispielwerten für die Kriterien generiert. Für das Szenario mit den Kriterienparametern aus Tabelle 4.1 und für die Kriterienwerte für drei Kommunikationswege aus den Entscheidungsmatrizen in Tabellen 4.2 und 4.3 wurden die besten Kommunikationswege mit Hilfe von MCDM-Methoden wie WSM, WPM, GRA, TOPSIS und VIKOR berechnet. Alle diese Methoden lieferten Weg 1 und Weg 3 als beste Lösungen jeweils für die Entscheidungsmatrizen in Tabellen 4.2 und 4.3.

|              | Verf. Bitrate<br>Mbit/s | Verzögerung<br>ms | Kosten<br>C/MByte | Gesamtnutzwert<br>(berechnet mittels WSM) |
|--------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---|
| <b>Weg 1</b> | <b>30</b>               | <b>50</b>         | <b>30</b>         | <b>0,305928</b>                           |
| Weg 2        | 10                      | 45                | 25                | 0,298450                                  |
| Weg 3        | 6                       | 43                | 23                | 0,300288                                  |

Tabelle 4.2: Entscheidungsmatrix mit Beispielkriterienwerten für drei Beispielwege. Weg 1 wurde als beste Alternative bestimmt.

|              | Verf. Bitrate<br>Mbit/s | Verzögerung<br>ms | Kosten<br>C/MByte | Gesamtnutzwert<br>(berechnet mittels WSM) |
|--------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---|
| Weg 1        | 30                      | 50                | 30                | 0,305928                                  |
| Weg 2        | 10                      | 45                | 25                | 0,298450                                  |
| <b>Weg 3</b> | <b>500</b>              | <b>100</b>        | <b>70</b>         | <b>0,726666</b>                           |

Tabelle 4.3: Entscheidungsmatrix mit Beispielkriterienwerten für drei Beispielwege. Weg 3 wurde als beste Lösung bestimmt.

Zuerst wird das Ergebnis für die Kriterienwerte aus Entscheidungsmatrix in Tabelle 4.2 betrachtet. Die Werte der Kriterien Verzögerung und Kosten des besten Weges 1 sind schlechter im Vergleich zu den Wegen 2 und 3, dafür ist aber die verfügbare Bitrate besser. Da die Bitrate höher priorisiert ist, wurde Weg 1 als der beste Weg bestimmt. Deswegen ist Weg 1 als Entscheidungsergebnis für die Entscheidungsmatrix in Tabelle 4.2 korrekt.

Im Gegensatz dazu ist Weg 3 als bester Weg für die Entscheidungsmatrix in Tabelle 4.3 fraglich. Die verfügbare Bitrate von 500 Mbit/s des Weges 3 ist die Höchste von allen drei Wegen. Allerdings ist sie höher als die für Video-Streaming-Anwendungen maximal erforderliche Bitrate von 25 Mbit/s. In einem solchen Fall wird von einem Überschuss gesprochen. Dagegen sind die Werte der Kriterien Verzögerung und Kosten schlechter als bei anderen Alternativen. Weg 3 ist somit eine ungünstige Entscheidung aus der Perspektive des Nutzers, da ihm ein Weg mit überflüssigen Bitraten-Kapazitäten zugeteilt wurde, der gleichzeitig langsamer (im Sinne der Verzögerung) und teurer als die anderen Wege ist. Auch aus der Sicht des Netzbetreibers ist die Entscheidung nicht günstig, da die Zuweisung des Kommunikationsweges mit dieser überflüssigen Bitrate eine unnötige Ressourcenbelegung hinsichtlich verfügbarer Bitrate bedeutet.

Zusammengefasst zeigt Weg 3 als das Handover-Entscheidungsergebnis für das oben beschriebene Szenario und für die Kommunikationswege aus Entscheidungsmatrix in Tabelle 4.3 einen deutlichen Überschuss bei einem Kriterium und gleichzeitig schlechtere Werte der restlichen zwei Kriterien im Vergleich zu Weg 1 und Weg 2. Im nächsten Abschnitt wird eine Lösung für dieses Problem vorgeschlagen.

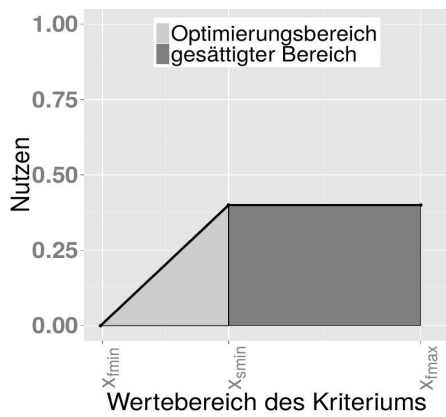
### 4.2.2 ORA-Beschreibung

Für die Bewältigung des im vorherigen Abschnitt beschriebenen Problems wird in diesem Abschnitt eine Lösung für die Überschussreduzierung namens ORA (engl. *Oversaturation Reduction Algorithm*) vorgeschlagen. ORA wurde in [YeSe16] veröffentlicht. Der Lösung liegt die Idee der Verbesserung der Werte von beschränkten Kriterien in Abhängigkeit von Anwendungsanforderungen nur bis zu einem bestimmten Schwellenwert zugrunde. Dafür wird der zulässige Bereich  $X_f = [x_{fmin}, x_{fmax}]$  der Nutzenfunktionen der Kriterien in einen *Optimierungsbereich*  $X_{opt} = [x_{omin}, x_{omax}] \subset X_f$  und einen *gesättigter Bereich*  $X_{sat} = [x_{smin}, x_{smax}] \subset X_f$  aufgeteilt. Dabei gilt  $x_{fmax} = x_{smax}$  für die Wertekriterien und  $x_{fmin} = x_{smin}$  für die Kostenkriterien.

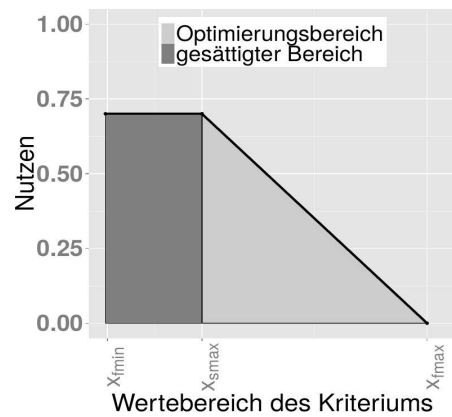
Die Nutzenfunktionen mit Optimierungsbereichen und gesättigten Bereichen für die Kosten- und Wertekriterien werden jeweils in Gleichungen (4.1) und (4.2) vorgestellt. Zur Veranschaulichung werden zwei Beispielnutzenfunktionen auch in Abbildungen 4.1a und 4.1b präsentiert. Die Abbildungen zeigen die Teilung der Nutzenfunktionen in einen Optimierungsbereich und einen gesättigten Bereich.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{fmin}}{x_{fmax} - x_{fmin}}, & \text{falls } x \in X_{opt} \\ \frac{x_{smin} - x_{fmin}}{x_{fmax} - x_{fmin}}, & \text{falls } x \in X_{sat} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x_{fmax} - x_{smax}}{x_{fmax} - x_{fmin}}, & \text{falls } x \in X_{sat} \\ \frac{x_{fmax} - x}{x_{fmax} - x_{fmin}}, & \text{falls } x \in X_{opt} \end{cases} \quad (4.2)$$



(a) Ein Beispiel einer Nutzenfunktion mit einem gesättigten Bereich für ein Wertekriterium



(b) Ein Beispiel einer Nutzenfunktion mit einem gesättigten Bereich für ein Kostenkriterium

Abbildung 4.1: Nutzenfunktionen mit gesättigten Bereichen

Die Verbesserung des Nutzwertes eines Kriteriums erfolgt außerhalb des gesättigten Bereiches, also im Optimierungsbereich. Innerhalb des gesättigten Bereiches wächst der Nutzwert des Kriteriums nicht. Dadurch werden die Werte der Kriterien in Op-

timierungsbereichen auf Kosten der gesättigten Bereiche verbessert. Die Anwendung von gesättigten Bereichen für die Nutzenfunktionen der beschränkten Kriterien (Kriterien mit gesättigten Bereichen) führt zu Überschussreduzierung bei Letzteren, was gleichzeitig eine Verbesserung der unbeschränkten Kriterien (Kriterien ohne gesättigte Bereiche) ermöglicht.

Bei der Konfiguration eines ORA-basierten Handover-Entscheidungsalgorithmus müssen in Abhängigkeit von den Eigenschaften der aktiven Anwendungen die Kriterien bestimmt werden, bei denen die Verwendung eines gesättigten Bereiches sinnvoll ist. Das sind logischerweise die Kriterien mit einem anwendungsspezifischen Optimierungsgrenzwert, der vom unteren oder oberen Wert des zulässigen Bereiches abweicht.

Die Konfiguration der gesättigten Bereiche für die relevanten Kriterien soll dynamisch und adaptiv sein. Das bedeutet, dass die gesättigten Bereiche vor jeder Handoverentscheidung basierend auf den Anforderungen der aktuell aktiven Anwendungen definiert werden müssen. Deswegen muss das Endgerät im Hinblick auf die laufenden Anwendungen überwacht werden.

## 4.3 Aggressive Überschussreduzierung

In diesem Abschnitt geht es in erster Linie um die Überschussreduzierung von beschränkten Kriterien. Die Überschussreduzierung trägt zu einer effizienteren Ressourcennutzung in den Kommunikationsnetzen bei, was dieses Thema für den Netzbetreiber relevant macht. Dabei wird die Idee der Überschussreduzierung aus dem vorherigen Abschnitt 4.2 vertieft. Bei dem in diesem Abschnitt vorgeschlagenen Algorithmus handelt es sich um das Erzielen einer Korrelation der Anwendungsanforderungen mit Eigenschaften der Kommunikationswege. Das heißt, dass einem Endgerät ein Kommunikationsweg zugeteilt werden soll, der am nächsten zu den Anwendungsanforderungen hinsichtlich aller Entscheidungskriterien liegt. Zum Beispiel soll einem Endgerät mit bestimmten Bitraten-Anwendungsanforderungen nach Möglichkeit ein Kommunikationsweg mit genau dieser verfügbaren Bitrate zugewiesen werden. Ein weiteres Beispiel wäre die Zuweisung eines Kommunikationsweges mit geringer Verzögerung an die Endgeräte mit Echtzeitanwendungen. Und umgekehrt müssen die Kommunikationswege mit hoher Verzögerung den Endgeräten mit verzögerungstoleranten Anwendungen zugeteilt werden.

In folgenden Abschnitten wird zuerst die Problemstellung auf Basis von zwei Fallstudien präsentiert. Im Anschluss daran kommt die Beschreibung des Überschussreduzierungsalgorithmus namens AORA.

### 4.3.1 Problembeschreibung und Motivation

Für die Problembeschreibung wird ein Beispielszenario mit zwei Anwendungsfällen benutzt. Es wird ein Szenario mit einem mobilen Endgerät und drei alternativen Kommunikationswegen betrachtet. Um das Szenario überschaubar zu halten, wird die Annahme getroffen, dass auf dem Endgerät nur eine Anwendung läuft, und zwar eine Video-Streaming-Anwendungen mit einer adaptiven Bitrate zwischen 3 und 50 Mbit/s. Für die Handoverentscheidung werden Kriterien wie verfügbare Bitrate und monetäre Kosten berücksichtigt. Die Parametrierung der Kriterien ist in Tabelle 4.4 dargestellt. Wie dieser Tabelle entnommen werden kann, ist das Kriterium verfügbare Bitrate ein beschränktes Kriterium mit dem Optimierungsbereich von 3 bis 50 Mbit/s und dem gesättigten Bereich zwischen 50 und 500 Mbit/s. Die Nutzenfunktionen für beide Kriterien werden in Abbildungen 4.2a, 4.2b dargestellt.

Außerdem existieren zwei Akteure ein Nutzer und ein Netzbetreiber, die ihre eigenen Optimierungsziele während der Handoverentscheidung verfolgen. Die Optimierungsziele des Nutzers sind:

- Maximierung der verfügbaren Bitrate bis 50 Mbit/s,
- Minimierung der Kosten bis 0 C/MByte.

Das Optimierungsziel des Netzbetreibers ist:

- Minimierung der verfügbaren Bitrate bis 50 Mbit/s.

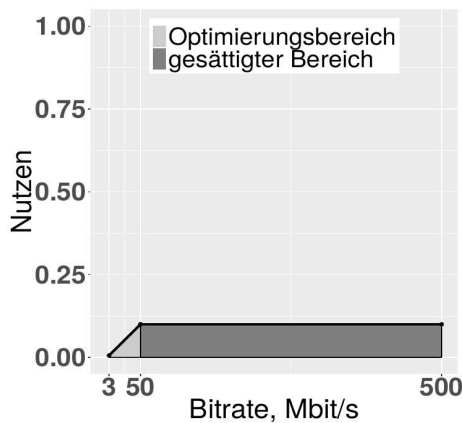
Für dieses Szenario werden im Folgenden zwei Anwendungsfälle berechnet.

|                                       | Verf. Bitrate     | Kosten              |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------|
| <i>Gewicht, %</i>                     | <i>50</i>         | <i>50</i>           |
| Zulässiger Wertebereich               | 3 – 500, Mbit/s   | 0 – 100, C/MByte    |
| Nutzenfunktion im Optimierungsbereich | $\frac{x-3}{497}$ | $\frac{100-x}{100}$ |
| Sättigungsbereich                     | 50 – 500, Mbit/s  |                     |
| Nutzenfunktion im Sättigungsbereich   | 0,094             |                     |

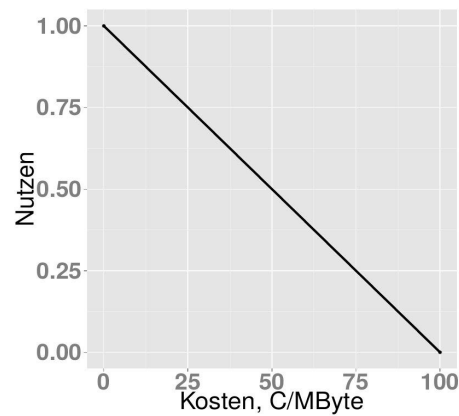
Tabelle 4.4: Parametrierung der Kriterien

#### *Anwendungsfall I, Problembeschreibung*

Es wird angenommen, es gibt eine Entscheidungsmatrix in Tabelle 4.5 mit Beispielen für das oben beschriebene Szenario. Die Werte des beschränkten Kriteriums verfügbare Bitrate liegen bei allen drei Beispielwegen im gesättigten Bereich, deswegen betragen die Nutzwerte dieses Kriteriums für alle drei Wege 0,094. Die Nutzwerte des unbeschränkten Kriteriums Kosten sind für alle drei Wege identisch, da deren



(a) Nutzenfunktion für die Bitrate



(b) Nutzenfunktion für die Kosten

Abbildung 4.2: Nutzenfunktionen für Anwendungsfall I

Werte gleich sind. Somit sind auch die Gesamtnutzwerte für alle drei Wege gleich, was das Bestimmen des besten Weges unmöglich macht.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines solchen Zustandes hängt von der Anzahl der Kriterien, von der Breite des gesättigten Bereiches und von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kriterienwerte und von der Granularität der Kriterienskala ab. Je kleiner die Anzahl der Kriterienwerte, je breiter der gesättigte Bereich, je geballter die Verteilung der Kriterienwerte (normalverteilt mit einer geringen Standardabweichung) und je gröber die Granularität der Werte (eine Rundung mit kleiner Genauigkeit, eine grobgranulare Skala) ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieses Zustandes.

|       | Verf. Bitrate<br>Mbit/s | Kosten<br>C/MByte | Gesamtnutzwert |
|-------|-------------------------|-------------------|----------------|
| Weg 1 | 50                      | 30                | 0,3973         |
| Weg 2 | 100                     | 30                | 0,3973         |
| Weg 3 | 150                     | 30                | 0,3973         |

Tabelle 4.5: Entscheidungsmatrix für den Anwendungsfall I mit der Kollision zwischen allen drei Kommunikationswege für die Kriterienkonfiguration aus Tabelle 4.4 und für die Nutzenfunktionen aus Abbildungen 4.2a, 4.2b

#### *Anwendungsfall II, Problembeschreibung*

Hier wird eine weitere Entscheidungsmatrix 4.6 mit anderen Beispielwerten für das oben beschriebene Szenario verwendet. Unter Anwendung der Kriterienparameter aus Tabelle 4.4 wird Weg 3 als beste Lösung bestimmt. Weg 3 genügt den Zielen des Nutzers, indem er verfügbare Bitrate über 50 Mbit/s und von drei Wegen die niedrigsten Kosten liefert. Somit ist Weg 3 die beste Lösung aus der Sicht des Nutzers. Gleichzeitig aber bringt Weg 3 einen wesentlichen Überschuss der verfügbaren Bitrate mit sich



und genügt damit dem Optimierungsziel des Netzbetreibers (Minimierung der verfügbaren Bitrate bis zu 50 Mbit/s) nicht. Somit ist Weg 3 keine optimale Lösung aus der Sicht des Netzbetreibers. Dieses Beispiel veranschaulicht den Interessenkonflikt zwischen den Akteuren Nutzer und Netzbetreiber.

|       | Verf. Bitrate<br>Mbit/s | Kosten<br>C/MByte | Gesamtnutzwert |
|-------|-------------------------|-------------------|----------------|
| Weg 1 | 50                      | 35                | 0,3723         |
| Weg 2 | 300                     | 33                | 0,3823         |
| Weg 3 | 400                     | 30                | 0,3973         |

Tabelle 4.6: Entscheidungsmatrix für den Anwendungsfall II für die Kriterienkonfiguration aus Tabelle 4.4 und für die Nutzenfunktionen aus Abbildungen 4.2a, 4.2b

#### *Prinzipielle Lösung für den Anwendungsfall I*

Für die Lösung des Problems aus dem Anwendungsfall I liegt der Gedanke nahe, die Nutzwerte für das beschränkte Kriterium verfügbare Bitrate im gesättigten Bereich ungünstiger als seine Nutzwerte im Optimierungsbereich zu gestalten. Dafür lässt sich das sogenannte *Strafverfahren* aus dem Bereich der mathematischen Optimierung anwenden. Dabei geht es um die Umgestaltung der Nutzenfunktion, die im Falle eines Wertekriteriums eine abfallende Teilfunktion im gesättigten Bereich bekommt. Eine Nutzenfunktion mit einer linearen Straffunktion nach Formel (4.3) für den gesättigten Bereich für das Kriterium verfügbare Bitrate kann wie in Abbildung 4.3 dargestellt aussehen.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-3}{497}, & \text{falls } x \in X_{\text{opt}} \\ \frac{500-x}{4787,23}, & \text{falls } x \in X_{\text{sat}} \end{cases} \quad (4.3)$$

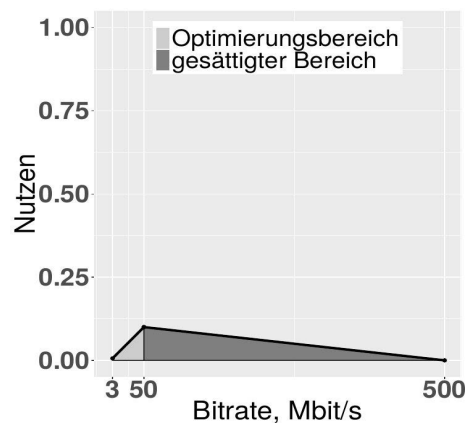


Abbildung 4.3: Nutzenfunktion für das Kriterium Bitrate mit der abfallenden Teilfunktion im gesättigten Bereich

Durch die Anwendung der Nutzenfunktion 4.3 für den Anwendungsfall I für das Kriterium Bitrate wird Weg 1 als bester Weg bestimmt. Dieser Weg hat den kleinsten Überschuss der Bitrate und verschlechtert die Kosten im Vergleich zu den Wegen 2 und 3 nicht. Somit genügt Weg 1 den Optimierungszielen sowohl des Nutzers als auch des Netzbetreibers. Zusammengefasst macht die Anwendung der Nutzenfunktion 4.3 für den Anwendungsfall I die Ermittlung des besten Weges möglich und verringert den Überschuss.

*Prinzipielle Lösung für den Anwendungsfall II (eine Kompromisslösung)*

Der Anwendungsfall II veranschaulicht ein Optimierungspotential. Das Optimierungspotential besteht in der Möglichkeit einer erheblichen Überschussreduzierung bei einigen Kriterien auf Kosten einer unwesentlichen Degradierung von anderen Kriterien. Durch die Anwendung der Nutzenfunktion (4.3) für den Anwendungsfall II für das Kriterium Bitrate wird Weg 1 als bester Weg bestimmt. Bei einer genauen Betrachtung der Entscheidungsmatrix aus Tabelle 4.6 und des Weges 1 als beste Lösung wird deutlich, dass im Vergleich zu Weg 3 (die beste Lösung berechnet nach Nutzenfunktionen aus Tabelle 4.4) die relative Degradierung der Kosten von 3 % weit geringer als die relative Überschussreduzierung der Bitrate von 33 % ist. Dabei sind die Werte der relativen Degradierung und der Überschussreduzierung auf die zulässigen Wertebereiche der Kriterien jeweils Kosten und Bitrate normiert. Weg 1 als die beste Alternative kann angesichts bestimmter Umstände oder Vereinbarungen als eine Kompromisslösung zwischen dem Nutzer und dem Netzbetreiber akzeptiert werden.

Im Folgenden werden zwei Techniken für Überschussreduzierung der beschränkten Kriterien in gesättigten Bereichen vorgestellt.

*Erste Methode: Nutzung von Straffunktionen*

Die erste Methode basiert auf der Nutzung von Straffunktionen, und sie wurde schon als Lösung für die Anwendungsfälle I und II vorgeschlagen. Der Einsatz von Straffunktionen bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Die größte Schwierigkeit liegt im Design einer Straffunktion. Die Straffunktionen lassen sich in lineare und nichtlineare unterteilen. Dabei haben die nichtlinearen Straffunktionen im Vergleich zu linearen mehr Potential für das Erzielen der Überschussreduzierung. Für die Gestaltung der nichtlinearen Funktionen können zum Beispiel exponentielle und logarithmische Funktionen benutzt werden. Dabei spielt die Steilheit eine wichtige Rolle. Je steiler abfallend eine Straffunktion<sup>1</sup> ist, desto höher ist das Potential für die Überschussreduzierung, da der Nutzwert des Kriteriums im gesättigten Bereich schnell abnimmt. Allerdings kann es bei der Anwendung von nichtlinearen Funktionen zu einem schwachen Einfluss von beschränkten Kriterien im flachen Bereich der

---

<sup>1</sup> Die Straffunktionen für die Wertekriterien sind abfallend und für die Kostenkriterien wachsend.

Strafffunktion (Bereiche in denen die Funktion gegen Null konvergiert) kommen. Laut der Rechercheergebnissen gibt es bislang keine Richtlinien für die Gestaltung der nichtlinearen Nutzenfunktionen und Strafffunktionen.

*Zweite Methode: distanzbasierte Lösung (Nutzung von Bewertungsmetriken)*

Die zweite Methode ist eine distanzbasierte Technik, bei der die Wege anhand der Distanzen zu dem von ORA kalkulierten besten Weg bewertet werden. Dabei werden normierte gewichtete Überschussreduzierungen für alle beschränkte Kriterien und normierte gewichtete Degradierungen von unbeschränkten Kriterien relativ zum mittels ORA bestimmten besten Weg berechnet. Basierend auf der Differenz und dem Verhältnis zwischen diesen zwei Werten wird der beste Weg ermittelt. Dieser Algorithmus wird im nächsten Abschnitt ausführlich erklärt.

### 4.3.2 AORA-Beschreibung

Das Ziel von AORA (engl. *Aggressive Oversaturation Reduction Algorithm*) ist eine Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien durch eine Degradierung der Werte von unbeschränkten Kriterien. Dabei soll das Verhältnis zwischen Überschussreduzierung und Degradierung kontrollierbar sein. AORA wurde auch in [YeSe17] vorgestellt.

AORA besteht aus den folgenden Schritten:

1. *Bestimmen des besten Weges mittels ORA nach Abschnitt 4.2.2.*

Dem besten Weg nach ORA wird der Kriterienwerte-Vektor  $A^* = \{x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_{|J|}^*\}$  zugewiesen. Dabei ist  $J$  die Indexmenge der Kriterien, und  $x_j^*$  ist der Wert des Kriteriums mit dem Index  $j \in J$ .

2. *Berechnung von relativen Abweichungen der Kriterienwerte aller Wege relativ zu dem besten ORA-Weg*

Für jeden Weg werden Abweichungen der Werte seiner Kriterien relativ zu dem besten ORA-Weg berechnet. Dabei werden relative gewichtete Überschussreduzierung  $relOptCoeff$  und relative gewichtete Degradierung  $relDegCoeff$  für jeden Weg  $i \in I$  kalkuliert. Bei der relativen gewichteten Überschussreduzierung geht es dabei um die Reduzierung des Überschusses der beschränkten Kriterien in ihren gesättigten Bereichen. Bei der relativen gewichteten Degradierung handelt es sich um die Verschlechterung der Werte aller Kriterien in deren Optimierungsbereichen.

Für die Berechnung des Koeffizienten  $relOptCoeff$  werden zuerst die relativen gewichteten Überschussreduzierungen von beschränkten Wertekriterien und von beschränkten Kostenkriterien, jeweils  $relOptCoeff_W$  und  $relOptCoeff_K$ , ermittelt. Die Berechnungen von  $relOptCoeff_W$ ,  $relOptCoeff_K$  und  $relOptCoeff$  erfolgen gemäß Formeln

(4.4), (4.5) und (4.6). Dabei ist  $J_{W_b} \subset J$  die Menge von beschränkten Wertekriterien und  $J_{K_b} \subset J$  ist die Menge von beschränkten Kostenkriterien.

$$relOptCoeff_{W_i} = \sum_{j \in J_{W_b}} w_j \begin{cases} \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \in X_{sat} \\ \frac{x_j^* - x_{smin_j}}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \notin X_{sat} \\ 0, & \text{falls } x_j^* \notin X_{sat} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$relOptCoeff_{K_i} = \sum_{j \in J_{K_b}} w_j \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_j^*}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \in X_{sat} \\ \frac{x_{smax_j} - x_j^*}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \notin X_{sat} \\ 0, & \text{falls } x_j^* \notin X_{sat} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$relOptCoeff_i = relOptCoeff_{W_i} + relOptCoeff_{K_i} \quad (4.6)$$

Für die Berechnung des Koeffizienten  $relDegCoeff$  werden zuerst die relativen gewichteten Degradierungen der Werte aller Wertekriterien und aller Kostenkriterien in deren Optimierungsbereichen, jeweils  $relDegCoeff_W$  und  $relDegCoeff_K$ , ermittelt. Die Berechnungen von  $relDegCoeff_W$ ,  $relDegCoeff_K$  und  $relDegCoeff$  erfolgen gemäß Formeln (4.7), (4.8) und (4.9).

$$relDegCoeff_{W_i} = \sum_{n=0}^{|J|} w_j \begin{cases} 0, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \in X_{sat} \\ \frac{x_{smin_j} - x_{ij}}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \notin X_{sat} \\ \frac{x_j^* - x_{smin_j}}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \notin X_{sat} \wedge x_{ij} \in X_{sat} \\ \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \notin X_{sat} \wedge x_{ij} \notin X_{sat} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$relDegCoeff_{K_i} = \sum_{n=0}^{|J|} w_j \begin{cases} 0, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \in X_{sat} \\ \frac{x_{ij} - x_{smax_j}}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \in X_{sat} \wedge x_{ij} \notin X_{sat} \\ \frac{x_{smax_j} - x_j^*}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \notin X_{sat} \wedge x_{ij} \in X_{sat} \\ \frac{x_{ij} - x_j^*}{x_{fmax_j} - x_{fmin_j}}, & \text{falls } x_j^* \notin X_{sat} \wedge x_{ij} \notin X_{sat} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$relDegCoeff_i = relDegCoeff_{W_i} + relDegCoeff_{K_i} \quad (4.9)$$

Dabei ist es wichtig anzumerken, dass ein positiver  $relOptCoeff$  von Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien zeugt. Ein negativer  $relOptCoeff$  bedeutet dagegen eine Steigerung des Überschusses bei beschränkten Kriterien, was mit AORA

vermieden werden soll. Deswegen lassen Formeln (4.4) und (4.5) keine negativen Ergebnisse zu. Ein positiver  $relDegrCoeff$  deutet auf Degradierung der Kriterienwerte in den Optimierungsbereichen hin. Bei einem negativen  $relDegrCoeff$  geht es dagegen um eine Verbesserung der Kriterienwerte in den Optimierungsbereichen.

### 3. Berechnung von $optToDegDiff$ , $optToDegRatio$

Der Koeffizient  $optToDegDiff$  charakterisiert die Differenz zwischen der relativen Überschussreduzierung der beschränkten Kriterien und der relativen Degradierung aller Kriterien. Der Koeffizient  $optToDegRatio$  beschreibt das Verhältnis zwischen Überschussreduzierung von beschränkten Kriterien zu der Degradierung aller Kriterien. Die Koeffizienten  $optToDegDiff$ ,  $optToDegRatio$  werden für jeden Weg  $i \in I$  wie folgt kalkuliert:

$$optToDegDiff_i = relOptCoeff_i - relDegrCoeff_i, \quad (4.10)$$

$$optToDegRatio_i = \frac{relOptCoeff_i}{relDegrCoeff_i}. \quad (4.11)$$

Je größer  $optToDegDiff$  ist, desto ausgeprägter ist die Überschussreduzierung zu Degradierung von unbeschränkten Kriterien und desto günstiger ist der Kommunikationsweg. Auch der Wert von  $optToDegRatio$  und die Attraktivität eines Kommunikationsweges stehen in einem direkt proportionalen Zusammenhang.

### 4. Bestimmung des besten Kommunikationsweges

In diesem Schritt wird der beste Kommunikationsweg basierend auf  $optToDegDiff$  und  $optToDegRatio$  bestimmt. Dabei wird der Weg mit dem besten  $optToDegDiff$  präferiert, der aber gleichzeitig mindestens einer der Bedingungen  $optToDegRatio > minOptToDegRatio$  und  $optToDegRatio < 0$  genügt. Mit dem Koeffizienten  $minOptToDegRatio$  lässt sich das Verhältnis zwischen Überschussreduzierung und Optimierung bei der Auswahl der besten Wege steuern. Der optimale Wert für den Koeffizienten  $minOptToDegRatio$  muss für jede Umgebung empirisch herausgefunden werden. Die Bestimmung des besten Weges sieht formal wie folgt aus:

$$A_{AORA} = \max_{i \in I} (optToDegDiff_i) \quad (4.12)$$

mit Nebenbedingung:  $optToDegRatio_i > minOptToDegRatio \vee optToDegRatio_i < 0$ .

Für ein besseres Verständnis sind die AORA-Koeffizienten in der beispielhaften Entscheidungsmatrix in Tabelle 4.7 dargestellt. Die besten Lösungen wurden für das Beispielszenario aus Abschnitt 4.3.1 mit Hilfe von ORA und AORA berechnet. Der

Koeffizient *minOptToDegRatio* wurde dabei auf 5 gesetzt, was eine mindestens fünf-fache Überschussreduzierung im Vergleich zur Degradierung sichert. Der Koeffizient *minOptToDegRatio* wurde auf den Wert 5 nach dem subjektiven Ermessen des Autors vorliegender Arbeit gesetzt. In einer realen Kommunikationsumgebung muss der optimale Wert für diesen Koeffizient empirisch ermittelt werden. Weg 2 wurde als die beste Lösung nach ORA bestimmt. Weg 4 ist die beste Lösung nach AORA. Dabei reduziert Weg 4 den Überschuss der verfügbaren Bitrate um knapp 38 % (normiert auf den zulässigen Bereich) und degradiert die Kosten um 6 % (normiert auf den zulässigen Bereich) im Vergleich zu Weg 2.

| Wege  | Verf. Bitrate<br>Mbit/s | Kosten<br>C/MByte | relOptCoeff<br>[0, 1] | relDegCoeff<br>[-1, 1] | optToDegRatio<br>[-∞, +∞] | optToDegrDiff<br>[-1, 1] |
|-------|-------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Weg 1 | 141,347                 | 55,686            | 0,195 15              | 0,167 91               | 1,162 23                  | 0,027 24                 |
| Weg 2 | 335,326                 | 22,104            | 0,0                   | 0,0                    | 0,0                       | 0,0                      |
| Weg 3 | 209,078                 | 68,463            | 0,127 01              | 0,231 79               | 0,547 94                  | -0,104 78                |
| Weg 4 | 146,869                 | 28,179            | 0,189 59              | 0,030 37               | 6,241 81                  | 0,159 22                 |
| Weg 5 | 169,493                 | 30,204            | 0,166 83              | 0,040 50               | 4,119 35                  | 0,126 33                 |

Tabelle 4.7: Beispiel-Entscheidungsmatrix für AORA erweitert mit AORA-Koeffizienten

Bei der Anwendung von AORA kann es zu einer Degradierung der beschränkten Kriterien in deren Optimierungsbereichen kommen. So ein Fall ist in Tabelle 4.8 gezeigt. Die beste Lösung nach ORA ist Weg 3 und die beste Lösung nach AORA ist Weg 2. Weg 2 bringt eine erhebliche Überschussreduzierung, dabei wird auch das *minOptToDegRatio* eingehalten. Allerdings bringt Weg 2 eine Reduzierung der verfügbaren Bitrate im Optimierungsbereich mit sich. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Überschussreduzierung sowohl auf Kosten der Degradierung vom unbeschränkten Kriterium als auch auf Kosten der Degradierung des unbeschränkten Kriteriums in seinem Optimierungsbereich erfolgt. Als Mechanismen gegen solche Degradierung werden zwei Modi vorgeschlagen, die in folgenden Absätzen vorgestellt werden.

| Wege  | Verf. Bitrate<br>Mbit/s | Kosten<br>C/MByte | relOptCoeff<br>[0, 1] | relDegCoeff<br>[-1, 1] | optToDegRatio<br>[-∞, +∞] | optToDegrDiff<br>[-1, 1] |
|-------|-------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Weg 1 | 86,168                  | 67,911            | -0,022 64             | 0,020 34               | -1,112 80                 | -0,042 98                |
| Weg 2 | 46,221                  | 31,371            | 0,013 74              | -0,162 35              | -0,084 66                 | 0,176 10                 |
| Weg 3 | 63,664                  | 63,842            | 0,0                   | 0,0                    | 0,0                       | 0,0                      |
| Weg 4 | 8,331                   | 82,752            | 0,013 74              | 0,094 55               | 0,145 38                  | -0,080 80                |
| Weg 5 | 29,632                  | 38,735            | 0,013 74              | -0,125 535             | -0,109 49                 | 0,139 28                 |

Tabelle 4.8: Beispiel-Entscheidungsmatrix für AORA erweitert mit AORA-Koeffizienten

*Modus 1: Reduzierung der Degradierung von beschränkten Kriterien in ihren Optimierungsbereichen*

In diesem Modus fließen die Degradierungen im Optimierungsbereich auch von beschränkten Kriterien in den *relDegCoeff* nach (4.7), (4.8) ein. Somit fällt diese Degradierung in die Koeffizienten *optToDegrRatio* und *optToDegrDiff* ins Gewicht, womit sie schließlich auch die Handoverentscheidung beeinflusst. Auf diese Weise wird die Degradierung von beschränkten Kriterien in ihren Optimierungsbereichen reduziert.

*Modus 2: Verhinderung der Degradierung von beschränkten Kriterien in ihren Optimierungsbereichen*

In diesem Modus werden alle Kommunikationswege, die eine Degradierung in den Optimierungsbereichen der beschränkten Kriterien aufweisen, aus der Entscheidungsmatrix verworfen. Somit wird eine Reduzierung der beschränkten Kriterien in Optimierungsbereichen verhindert.

## 4.4 Numerische Simulationen

Dieser Abschnitt beschreibt numerische Untersuchungen der in vorherigen Abschnitten vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen. Dafür wurde ein Szenario definiert und im Folgenden beschrieben. Das Szenario wurde für ein imaginäres mobiles handoverfähiges Multimode-Endgerät mit einer aktiven Video-Streaming-Anwendung konzipiert. Hierbei wurde eine adaptive Bitrate von 3 bis 50 Mbit/s für die Video-Streaming-Anwendung festgelegt. Vier QoS-Kriterien wie Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate, verfügbare Bitrate und das wirtschaftliche Kriterium monetäre Kosten werden in die Handoverentscheidung einbezogen.

Die Parametrierung der Kriterien wird in Tabelle 4.9 vorgestellt. Diese Tabelle ist in mehrere Sektionen für verschiedene Modi aufgeteilt. Die ersten zwei Parameter *Gewicht* und *zulässiger Bereich* gelten für alle Modi. Da es um eine Streaming-Anwendung geht, wurde das Kriterium verfügbare Bitrate am höchsten priorisiert. Der zulässige Wertebereich für die verfügbare Bitrate wurde entsprechend der maximalen Bitrate des Standards IEEE 802.11n [IEEE09a] gesetzt. Die zulässigen Kriterienwertebereiche für die Kriterien Verzögerung, Jitter und Paketverlustrate wurden entsprechend der Empfehlungen für Streaming-Anwendungen aus [SzHa04] konfiguriert. Der Wertebereich für die Kosten wurde annähernd zu aktuellen Datentarifen festgelegt.

In der Sektion *Referenzmodus* geht es um den MCDM-Entscheidungsmodus basierend auf Nutzenfunktionen, bei denen Kriterien in ihren gesamten zulässigen Bereichen hinsichtlich ihrer Nutzen verbessert werden. Die Nutzenfunktionen der Kriterien wurden nach der absoluten Max-Min-Normierungstechnik aus Tabelle 2.5 in Abschnitt 2.3.2 erstellt.

|  | Verzögerung                    | Jitter            | Paketverlustrate | Verfügbare<br>Bitrate | Kosten              |
|--|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>Allgemeine Parameter</b>                  |                                |                   |                  |                       |                     |
| Gewicht, $[0, 1]$                            | 0,05                           | 0,05              | 0,1              | 0,4                   | 0,4                 |
| Zulässiger Bereich                           | 0 – 2000                       | 0-50              | 0 – 5            | 3 – 500               | 0 – 100             |
| <b>Referenzmodus</b>                         |                                |                   |                  |                       |                     |
| Nutzenfunktion                               | $\frac{2000-x}{2000}$          | $\frac{50-x}{50}$ | $\frac{5-x}{5}$  | $\frac{x-3}{500}$     | $\frac{100-x}{100}$ |
| <b>ORA-Modus</b>                             |                                |                   |                  |                       |                     |
| Gesättigter Bereich                          | 0 – 1000                       |                   |                  | 50 – 500              |                     |
| Nutzenfunktion im<br>Optimierungsbereich     | $\frac{2000-x}{2000}$          | $\frac{50-x}{50}$ | $\frac{5-x}{5}$  | $\frac{x-3}{497}$     | $\frac{100-x}{100}$ |
| Nutzwert im<br>gesättigten Bereich, $[0, 1]$ | 0,5                            |                   |                  | 0,0994                |                     |
| <b>AORA-Modus 1</b>                          | keine minDegOptRatio-Kontrolle |                   |                  |                       |                     |
| <b>AORA-Modus 2</b>                          | minDegOptRatio=5               |                   |                  |                       |                     |
| <b>AORA-Modus 3</b>                          | minDegOptRatio=10              |                   |                  |                       |                     |

Tabelle 4.9: Parametrierung der Kriterien für die Simulation

In der Sektion *ORA-Modus* wird die Parametrierung für ORA aus Abschnitt 4.2 vorgestellt. Hier kommen gesättigte Bereiche für die Kriterien Verzögerung und verfügbare Bitrate zum Einsatz. Somit sind die Kriterien Verzögerung und verfügbare Bitrate beschränkt und die restlichen drei Kriterien sind unbeschränkt. Laut [SzHa04], ist eine Verzögerung bis 1000 ms für Video-Streaming-Anwendungen zulässig. Deswegen wurde ein gesättigter Bereich von 0 bis 1000 ms für das Kriterium Verzögerung gesetzt. Für das Kriterium verfügbare Bitrate wurde der gesättigte Bereich entsprechend der erforderlichen Bitrate der laufenden Video-Streaming-Anwendungen (von 3 bis 50 Mbit/s) und der oberen Grenze des gesättigten Bereiches (500 Mbit/s) gewählt. Diese zwei Kriterien nutzen im Optimierungsbereich die gleichen Nutzenfunktionen wie der *Referenzmodus*. Die Nutzwerte für die gesättigten Bereiche wurden mittels Nutzenfunktionen der Optimierungsbereiche für das Ende des gesättigten Bereiches (für die Verzögerung) und für den Anfang des gesättigten Bereiches (für die verfügbare Bitrate) berechnet.

Die letzten drei Sektionen beinhalten *AORA-Modi*, bei denen der Koeffizient *min-OptToDegRatio* (beschrieben in Abschnitt 4.3.2) mit unterschiedlichen Werten konfiguriert ist.

Die Simulation wurde mit Hilfe des FLASHED-Frameworks im autonomen Modus durchgeführt, welches in Kapitel 5 ausführlich beschrieben wird. Für jeden Simulationsmodus wurden fünfhundert Handoverentscheidungen simuliert. Für jede Handoverentscheidung wurden fünf Kommunikationswege generiert. Ein Kommunikationsweg modelliert dabei einen Link zu einem WLAN-Zugangspunkt. Für alle Kommunikationswege wurden Kriterienwerte im Rahmen der zulässigen Wertebereiche für die



Kriterien aus Tabelle 4.9 mit dem Zufallszahlengenerator *java.util.Random* [Rand16] aus der Java-Bibliothek im gleichmäßigen Verteilungsmodus generiert. Jede Hand-overentscheidung wurde mit Hilfe der MCDM-Methoden WSM, WPM, TOPSIS, VIKOR und GRA durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse sind in Tabellen 4.10, 4.11 pro Simulationsmodus und pro MCDM-Methode dargestellt.

|  | Verzögerung<br>ms | Jitter<br>ms | Paketverlustrate<br>[0, 1] | Verf. Bitrate<br>Mbit/s | Kosten<br>C/MByte |
|--|-------------------|--------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|
| <b>Referenzmodus</b>   |                   |              |                            |                         |                   |
| WSM  | 944,647           | 23,821       | 0,023                      | 358,665                 | 28,182            |
| WPM  | 955,779           | 23,118       | 0,022                      | 355,133                 | 28,961            |
| TOPSIS   | 979,463           | 25,088       | 0,024                      | 358,893                 | 27,671            |
| VIKOR  | 964,506           | 25,300       | 0,024                      | 357,767                 | 28,944            |
| GRA  | 898,872           | 22,729       | 0,021                      | 356,689                 | 30,899            |
| <b>ORA-Modus</b>   |                   |              |                            |                         |                   |
| WSM  | 957,790           | 23,595       | 0,022                      | 255,344                 | 19,769            |
| WPM  | 930,129           | 22,396       | 0,020                      | 264,796                 | 22,812            |
| TOPSIS   | 974,888           | 24,465       | 0,022                      | 255,948                 | 19,571            |
| VIKOR  | 961,610           | 24,293       | 0,022                      | 264,499                 | 20,436            |
| GRA  | 939,336           | 22,987       | 0,022                      | 256,746                 | 20,149            |
| <b>AORA-Modus 1</b> (keine <i>minDegOptRatio</i> -Kontrolle) |                   |              |                            |                         |                   |
| WSM  | 1013,830          | 24,524       | 0,023                      | 150,810                 | 27,687            |
| WPM  | 1016,918          | 24,314       | 0,023                      | 151,369                 | 27,732            |
| TOPSIS   | 1013,888          | 24,460       | 0,023                      | 151,236                 | 27,725            |
| VIKOR  | 1010,779          | 24,509       | 0,023                      | 150,491                 | 27,740            |
| GRA  | 1014,165          | 24,571       | 0,023                      | 150,747                 | 27,712            |
| <b>AORA-Modus 2</b> ( <i>minDegOptRatio</i> = 5)             |                   |              |                            |                         |                   |
| WSM  | 982,992           | 23,908       | 0,022                      | 225,580                 | 20,144            |
| WPM  | 975,585           | 23,417       | 0,022                      | 221,746                 | 20,968            |
| TOPSIS   | 979,973           | 23,936       | 0,022                      | 225,314                 | 20,166            |
| VIKOR  | 979,973           | 23,936       | 0,022                      | 225,314                 | 20,166            |
| GRA  | 980,564           | 23,906       | 0,022                      | 224,998                 | 20,176            |
| <b>AORA-Modus 3</b> ( <i>minDegOptRatio</i> = 10)            |                   |              |                            |                         |                   |
| WSM  | 984,024           | 23,844       | 0,022                      | 236,220                 | 19,813            |
| WPM  | 977,091           | 23,274       | 0,021                      | 229,884                 | 20,818            |
| TOPSIS   | 983,392           | 23,927       | 0,022                      | 235,763                 | 19,863            |
| VIKOR  | 980,912           | 23,925       | 0,022                      | 234,184                 | 19,903            |
| GRA  | 980,860           | 23,815       | 0,022                      | 235,525                 | 19,811            |

Tabelle 4.10: Durchschnittswerte der Kriterienwerte für verschiedene Simulationsmodi

In Tabelle 4.10 wurden Kriteriendurchschnittswerte der besten Wege zusammengetragen. Im Folgenden werden ORA- und AORA-Ergebnisse diskutiert. Dabei werden Ergebnisunterschiede zwischen verschiedenen Modi auf die zulässigen Bereiche der jeweiligen Kriterien normiert. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen berechnet mit unterschiedlichen MCDM-Methoden sind unwesentlich, deswegen wird auf sie in den nachfolgenden Diskussionen nicht eingegangen. Darüber hinaus sind auch die Ergebnisunterschiede bei den Kriterien Verzögerung, Jitter und Paketverlustrate zwischen verschiedenen Modi gering. Dies ist auf die geringen Gewichte dieser Kriterien (siehe Tabelle 4.9) zurückzuführen. Dagegen sind die Ergebnisunterschiede bei den hoch priorisierten Kriterien verfügbare Bitrate und Kosten deutlich erkennbar. Für die Analyse werden die Ergebnisse der MCDM-Methode GRA benutzt.

Zuerst werden die Kriteriendurchschnittswerte der *Referenzmodus* und des *ORA-Modus* aus Tabelle 4.10 betrachtet. Die Kriterienwerte der beiden beschränkten Kriterien Verzögerung und verfügbare Bitrate liegen in gesättigten Bereichen bei beiden Modi. Im Vergleich zum *Referenzmodus* ist die Verzögerung gewachsen und die Bitrate ist gesunken (jeweils um 2 % und 20 %). Das bedeutet eine Überschussreduzierung beider Kriterien im *ORA-Modus*. Die Werte der unbeschränkten Kriterien Jitter und Paketverlustrate verschlechtern sich unwesentlich (jeweils um 0,5 % und 2,4 %). Dafür verbessert sich das dritte unbeschränkte Kriterium Kosten erheblich (um 10 %). Die Verschlechterung von Jitter und Paketverlustrate einerseits und die Verbesserung der Kosten andererseits können mit einer stark unterschiedlichen Priorisierung erklärt werden. Unter diesen drei Kriterien ist das Kriterium Kosten wesentlich höher priorisiert. Zusammengefasst zeigen diese Ergebnisse, wie beim Einsatz von ORA erwünscht, eine Verbesserung der Werte von unbeschränkten Kriterien durch die Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien.

Die folgenden Abschnitte präsentieren die Ergebnisse der Anwendung von AORA mit verschiedenen Werten für *minOptDegRatio*. Die Ergebnisse der Verwendung von AORA ohne *minOptDegRatio* im *AORA-Modus 1* zeugen im Vergleich zu den ORA-Ergebnissen von einer starken Überschussreduzierung von beschränkten Kriterien wie Verzögerung und verfügbarer Bitrate (jeweils 3 % und 21 %), was aus Sicht des Netzbetreibers ein positives Ergebnis ist. Allerdings verschlechtern sich die Werte von unbeschränkten Kriterien wie Jitter, Paketverlustrate und Kosten deutlich (jeweils um 3 %, 2 % und 7 %). Somit ist dieses Ergebnis aus der Perspektive des Nutzers nicht zufriedenstellend. Genau um solche ungünstige Ergebnisse zu vermeiden wurde der *minOptDegRatio* Koeffizient für AORA eingeführt (4.3.2). In *AORA-Modus 2* und in *AORA-Modus 3* sind diejenigen Kriteriendurchschnittswerte der besten Wege dargestellt, die mit Hilfe von AORA mit Verwendung von *minOptDegRatio* mit den Werten von 5 und 10 berechnet wurden. Die Werte aus der Sektion *AORA-Modus 2* zeigen im Vergleich zu *AORA-Modus 1* eine moderatere Überschussreduzierung und nur eine geringe Degradierung von unbeschränkten Kriterien. *AORA-Modus 3* bringt nur unwesentliche Unterschiede zum *AORA-Modus 2* mit sich. Die Überschussreduzierung schwächt ab und dadurch verbessern sich (aber auch nur leicht) die Werte von beschränkten Kriterien.

In Tabelle 4.11 wurden die Änderungen der Kriteriennutzwerte der besten Wege zwischen den *ORA-* und *AORA-Modi* relativ zu dem *Referenzmodus* pro MCDM-Methode zusammengetragen. Die ersten drei Spalten gehören der Sektion *Überschussreduzierung* an. Hier sind die Werte der relativen Überschussreduzierung für die beschränkten Kriterien und auch *relOptCoeff* vorgestellt, nämlich normierte gewichtete Summe der Überschussreduzierung von beschränkten Kriterien (beschrieben in Ab-

| Überschussreduzierung   |         |             |             | Degradierung in Optimierungsbereichen |         |         |        | optToDegDiff |               |
|---|---------|-------------|-------------|---------------------------------------|---------|---------|--------|--------------|---------------|
| Verzögerung   | VBR     | relOptCoeff | Verzögerung | Jitter                                | PV      | VBR     | Kosten | relDegCoeff  | optToDegRatio |
| <b>Referenzmodus zu ORA-Modus</b>                                     |         |             |             |                                       |         |         |        |              |               |
| WSM   | 0,0066  | 0,2079      | 0,0835      | 0,0000                                | -0,0045 | -0,0104 | 0,0000 | -0,0349      | -2,3908       |
| WPM   | -0,0128 | 0,1818      | 0,0721      | 0,0000                                | -0,0144 | -0,0438 | 0,0000 | -0,0297      | -2,4264       |
| TOPSIS  | -0,0023 | 0,2071      | 0,0827      | 0,0000                                | -0,0125 | -0,0399 | 0,0000 | -0,0370      | -2,2353       |
| VIKOR   | -0,0014 | 0,1877      | 0,0750      | 0,0000                                | -0,0201 | -0,0379 | 0,0000 | -0,0378      | -1,9823       |
| GRA   | 0,0202  | 0,2011      | 0,0814      | 0,0000                                | 0,0051  | 0,0246  | 0,0000 | -0,0403      | -2,0217       |
| <b>Referenzmodus zu AORA-Modus 1 (keine minDegOptRatio-Kontrolle)</b> |         |             |             |                                       |         |         |        |              |               |
| WSM   | 0,0277  | 0,4182      | 0,1687      | 0,0069                                | 0,0141  | 0,0114  | 0,0000 | 0,0002       | 816,1299      |
| WPM   | 0,0221  | 0,4100      | 0,1651      | 0,0085                                | 0,0239  | 0,0163  | 0,0000 | -0,0017      | -99,0090      |
| TOPSIS  | 0,0103  | 0,4178      | 0,1676      | 0,0069                                | -0,0126 | -0,0187 | 0,0000 | -0,0019      | -86,7259      |
| VIKOR   | 0,0177  | 0,4171      | 0,1677      | 0,0054                                | -0,0158 | -0,0128 | 0,0000 | -0,0066      | -25,3316      |
| GRA   | 0,0506  | 0,4144      | 0,1683      | 0,0071                                | 0,0368  | 0,0479  | 0,0000 | -0,0058      | -29,2164      |
| <b>ORA-Modus zu AORA-Modus 1 (keine minDegOptRatio-Kontrolle)</b>     |         |             |             |                                       |         |         |        |              |               |
| WSM   | 0,0211  | 0,2103      | 0,0852      | 0,0069                                | 0,0186  | 0,0218  | 0,0000 | 0,0351       | 2,4252        |
| WPM   | 0,0349  | 0,2282      | 0,0930      | 0,0085                                | 0,0384  | 0,0601  | 0,0000 | 0,0280       | 3,3189        |
| TOPSIS  | 0,0126  | 0,2107      | 0,0849      | 0,0069                                | -0,0001 | 0,0212  | 0,0000 | 0,0351       | 2,4201        |
| VIKOR   | 0,0192  | 0,2294      | 0,0927      | 0,0054                                | 0,0043  | 0,0151  | 0,0000 | 0,0312       | 2,9707        |
| GRA   | 0,0303  | 0,2133      | 0,0868      | 0,0071                                | 0,0317  | 0,0234  | 0,0000 | 0,0345       | 2,5147        |
| <b>Referenzmodus zu AORA-Modus 2 (minDegOptRatio = 5)</b>             |         |             |             |                                       |         |         |        |              |               |
| WSM   | 0,0192  | 0,2678      | 0,1081      | 0,0000                                | 0,0018  | -0,0125 | 0,0000 | -0,0333      | -3,2445       |
| WPM   | 0,0099  | 0,2684      | 0,1078      | 0,0000                                | 0,0060  | -0,0150 | 0,0000 | -0,0332      | -3,2516       |
| TOPSIS  | 0,0003  | 0,2688      | 0,1075      | 0,0000                                | -0,0231 | -0,0428 | 0,0000 | -0,0354      | -3,0331       |
| VIKOR   | 0,0077  | 0,2665      | 0,1070      | 0,0000                                | -0,0273 | -0,0352 | 0,0000 | -0,0400      | -2,6748       |
| GRA   | 0,0408  | 0,2650      | 0,1080      | 0,0000                                | 0,0235  | 0,0256  | 0,0000 | -0,0392      | -2,7593       |
| <b>ORA-Modus zu AORA-Modus 2 (minDegOptRatio = 5)</b>                 |         |             |             |                                       |         |         |        |              |               |
| WSM   | 0,0126  | 0,0599      | 0,0246      | 0,0000                                | 0,0063  | -0,0020 | 0,0000 | 0,0016       | 15,2627       |
| WPM   | 0,0227  | 0,0866      | 0,0358      | 0,0000                                | 0,0204  | 0,0289  | 0,0000 | -0,0184      | -10,3197      |
| TOPSIS  | 0,0025  | 0,0616      | 0,0248      | 0,0000                                | -0,0106 | -0,0029 | 0,0000 | 0,0016       | 15,8262       |
| VIKOR   | 0,0092  | 0,0788      | 0,0320      | 0,0000                                | -0,0072 | -0,0073 | 0,0000 | -0,0022      | -14,7574      |
| GRA   | 0,0206  | 0,0639      | 0,0266      | 0,0000                                | 0,0184  | 0,0011  | 0,0000 | 0,0011       | 23,3892       |
| <b>Referenzmodus zu AORA-Modus 3 (minDegOptRatio = 10)</b>            |         |             |             |                                       |         |         |        |              |               |
| WSM   | 0,0197  | 0,2464      | 0,0995      | 0,0000                                | 0,0005  | -0,0116 | 0,0000 | -0,0346      | -2,8760       |
| WPM   | 0,0107  | 0,2520      | 0,1013      | 0,0000                                | 0,0031  | -0,0178 | 0,0000 | -0,0342      | -2,9636       |
| TOPSIS  | 0,0020  | 0,2477      | 0,0992      | 0,0000                                | -0,0232 | -0,0435 | 0,0000 | -0,0367      | -2,7000       |
| VIKOR   | 0,0082  | 0,2487      | 0,0999      | 0,0000                                | -0,0275 | -0,0357 | 0,0000 | -0,0411      | -2,4292       |
| GRA   | 0,0410  | 0,2438      | 0,0996      | 0,0000                                | 0,0217  | 0,0282  | 0,0000 | -0,0405      | -2,4614       |
| <b>ORA-Modus zu AORA-Modus 3 (minDegOptRatio = 10)</b>                |         |             |             |                                       |         |         |        |              |               |
| WSM   | 0,0131  | 0,0385      | 0,0160      | 0,0000                                | 0,0050  | -0,0011 | 0,0000 | 0,0004       | 51,4797       |
| WPM   | 0,0235  | 0,0702      | 0,0293      | 0,0000                                | 0,0176  | 0,0261  | 0,0000 | -0,0045      | -6,5144       |
| TOPSIS  | 0,0043  | 0,0406      | 0,0165      | 0,0000                                | -0,0107 | -0,0036 | 0,0000 | 0,0003       | 59,5691       |
| VIKOR   | 0,0097  | 0,0610      | 0,0249      | 0,0000                                | -0,0074 | -0,0078 | 0,0000 | -0,0053      | -7,5803       |
| GRA   | 0,0208  | 0,0427      | 0,0181      | 0,0000                                | 0,0166  | 0,0036  | 0,0000 | -0,0002      | -111,2496     |

Tabelle 4.11: Änderungen der Kriteriennutzwerte der besten Wege zwischen den *ORA-Modus* und *AORA-Modi* relativ zu dem *Referenzmodus* berechnet mit Hilfe verschiedener MCDM-Methoden

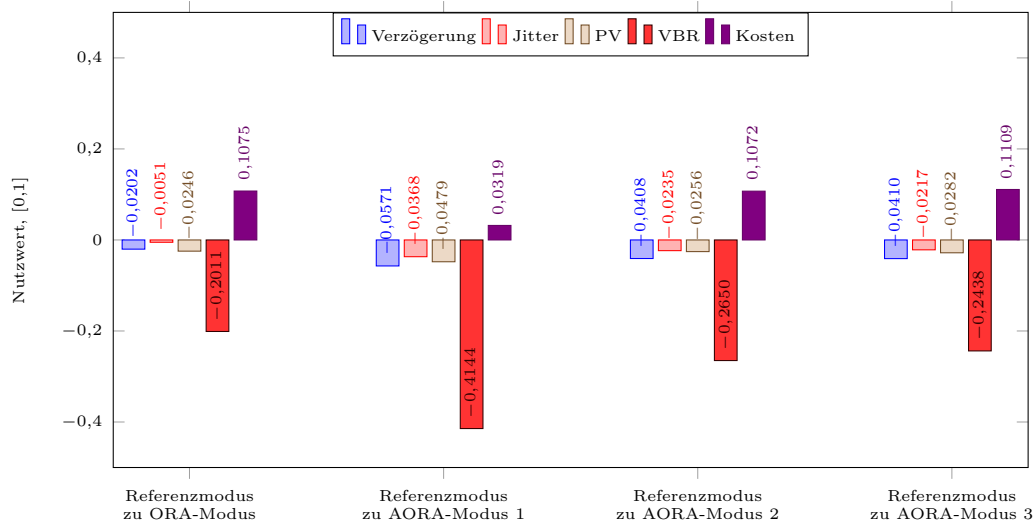


Abbildung 4.4: Unterschiede der Kriteriennutzwerte der besten Wege zwischen den *ORA-Modus* und *AORA-Modi* relativ zu dem *Referenzmodus* berechnet mittels GRA

schnitt 4.3.2). Die zweite Sektion *Degradierung im Optimierungsbereich* beinhaltet die Werte der relativen Degradierung der Kriterien in deren Optimierungsbereichen. Dabei geht es sowohl um beschränkte als auch um unbeschränkte Kriterien. In dieser Sektion ist auch der *relDegCoeff* (normierte gewichtete Summe der Degradierung aller Kriterien in deren Optimierungsbereichen, beschrieben in Abschnitt 4.3.2) aufgeführt. Die letzten zwei Spalten beinhalten die Werte von *optToDegRatio* und *optToDegDiff* (beschrieben in Abschnitt 4.3.2). Die Änderungen der Kriteriennutzwerte in dieser Tabelle korrelieren mit den Änderungen der Kriteriendurchschnittswerte in Tabelle 4.10.

Für eine bessere Anschaulichkeit sind die Unterschiede der Kriteriennutzwerte der besten Wege berechnet mit *GRA* zwischen dem *Referenzmodus* und den *ORA-* und *AORA-Modi* in Abbildung 4.4 präsentiert.

Die Simulationsergebnisse führen deutliche Vorteile von ORA vor Augen. Die Ergebniswerte zeigen eine Verbesserung der Werte von unbeschränkten Kriterien proportional zu deren Gewichten durch eine Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien.

Die Simulationsergebnisse veranschaulichen auch den Nutzen der Verwendung von AORA. Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich, dass AORA basierend auf dem ORA-Ergebnis eine weitere Überschussreduzierung durch eine Degradierung von unbeschränkten Kriterien bei Einhaltung eines vorgegebenen Verhältnisses zwischen Überschussreduzierung von beschränkten und Degradierung von unbeschränkten Kriterien durch *minDegOptRatio* ermöglicht.

Es sollte auch nicht unerwähnt bleiben, dass der Grad der Verbesserung der Kriterienwerte bei Anwendung von ORA und AORA stark von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kriterienwerte und von der Relation zwischen Optimierungsbereich und gesättigten Bereichen bei gesättigten Kriterien abhängt. Generell gelten folgende zwei Regeln:

- je breiter die Streuung der Werte der unbeschränkten Kriterien ist, desto höher ist deren Verbesserungspotential,
- je breiter der gesättigte Bereich eines beschränkten Kriteriums ist, je mehr Kriterienwerte der Alternativen im gesättigten Bereich liegen und je breiter die Streuung der Kriterienwerte der Alternative im gesättigten Bereich ist, desto höher ist das Überschussreduzierungspotential der beschränkten Kriterien und das Verbesserungspotential der unbeschränkten Kriterien.

## 4.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei Entscheidungsalgorithmen für den Handover vorgestellt. Beim ersten Algorithmus ORA wurde eine Unterteilung in beschränkte und unbeschränkte Kriterien abhängig von Anforderungen von laufenden Anwendungen vorgeschlagen. Für die beschränkten Kriterien kommen in den Nutzenfunktionen sogenannte gesättigte Bereiche zum Einsatz, die anwendungsspezifisch definiert werden müssen. Die Verwendung solcher Nutzenfunktionen mit gesättigten Bereichen hat einerseits eine Verbesserung der Werte von unbeschränkten Kriterien und andererseits eine Überschussreduzierung der Werte von beschränkten Kriterien zur Folge, was sowohl für den Nutzer als auch für den Netzbetreiber gewinnbringend ist.

Der zweite Algorithmus AORA baut auf den ORA-Ergebnissen auf und verfolgt das Ziel einer zu den ORA-Ergebnissen zusätzlichen Überschussreduzierung auf Kosten von unbeschränkten Kriterien. AORA macht es durch die Verwendung des Koeffizienten *minDegOptRatio* möglich, das Verhältnis zwischen einer Überschussreduzierung in gesättigten Bereichen und einer Degradierung in Optimierungsbereichen zu kontrollieren. AORA kann als eine Kompromisslösung angesehen werden, bei der es sich um einen Kompromiss zwischen den Interessen der Nutzer (Verbesserung der Kriterienwerte) und des Netzbetreibers (Überschussreduzierung) handelt.

Beide vorgeschlagene Entscheidungsalgorithmen wurden mit Hilfe numerischer Simulationen evaluiert. Dabei wurde ein Szenario für eine Video-Streaming-Anwendung mit einer adaptiven Bitrate definiert. Für die Handoverentscheidungen wurden fünf Kriterien verwendet. Da es um eine Video-Streaming-Anwendung geht, wurden für die Kriterien Verzögerung und verfügbare Bitrate entsprechende gesättigte Bereiche

definiert. Dabei wurden zwei Kriterien, Kosten und verfügbare Bitrate, am höchsten priorisiert. Es wurden fünf Modi konfiguriert. Der Referenzmodus nutze für alle Kriterien die Normierungsfunktionen ohne gesättigte Bereiche. Der zweite Modus wurde auf Basis von ORA aufgebaut und die weiteren drei Modi auf Basis von AORA mit unterschiedlichen Werten für den Parameter *minDegOptRatio*. Es wurden fünfhundert Handoverentscheidungen für jeden Modus durchgeführt. Die Ergebnisse für den ORA-Modus zeigen eine deutliche Verbesserung des unbeschränkten Kriteriums Kosten (10 % vom erlaubten Bereich, beim GRA-Einsatz) und eine wesentliche Überschussreduzierung der verfügbaren Bitrate (20 % vom erlaubten Bereich, beim GRA-Einsatz) im Vergleich zum Referenzmodus. Die AORA-Modi führen zu einer weiteren Überschussreduzierung der verfügbaren Bitrate (4 % vom erlaubten Bereich, beim GRA-Einsatz) im Vergleich zu ORA. Die Ergebnisse der AORA-Modi veranschaulichen die Bedeutung des AORA-Parameters *minDegOptRatio*. Die Erhöhung des Wertes von *minDegOptRatio* führt zu einer Senkung der Überschussreduzierung hinsichtlich verfügbarer Bitrate aber dafür auch zu einer Reduzierung der Kosten. Zusammengefasst zeigen numerische Simulationen das erwartete Verhalten der Algorithmen ORA und AORA.

Beide Algorithmen wurden implementiert und in das FLASHED-Framework integriert. Das FLASHED-Framework wird im nachfolgenden Kapitel (Kapitel 5) vorgestellt.

## 5 Framework für die Handoverentscheidungsphase

Dieses Kapitel stellt ein flexibles modulares Framework für eine multikriterielle anwendungssensitive Handoverentscheidung vor. Das Framework adressiert die im Rahmen der Recherche in Kapitel 3 in Abschnitt 3.5 aufgedeckten offenen Themen. Das vorgeschlagene Framework ermöglicht sowohl eine umfangreiche flexible Konfiguration als auch die Durchführung der Entscheidungsphase des Handovers. Das Kapitel beginnt in Abschnitt 5.1 mit einer Darlegung der Motivationen und einer Auflistung der Anforderungen an das Framework. Nachfolgender Abschnitt 5.2 beschäftigt sich mit dem Konzept des Frameworks inklusive seiner Bestandteile. Abschnitt 5.3 stellt die Struktur und die Funktionsweise des Frameworks anhand einer Fallstudie vor. Abschnitt 5.4 gibt einen Überblick über die Implementierung des Frameworks inklusive seiner Funktionsblöcke.

### 5.1 Motivation und Einführung

In diesem Kapitel wird ein flexibles anwendungssensitives Framework für die multikriterielle Handoverentscheidung vorgestellt, welches im Weiteren als FLASHED-Framework bezeichnet wird. FLASHED ist ein Akronym, welches sich aus dem Englischen wie folgt zusammensetzt: ***FL**exible **A**pplication-**S**ensitive **H**andov**Er** **D**ecision*. Das FLASHED-Framework ist eine Weiterentwicklung des Frameworks, das in [YeSe15] beschrieben wurde. Der aktuelle Stand des FLASHED-Frameworks wurde in [YeDS17] präsentiert. Das FLASHED-Framework adressiert die im Rahmen der Recherche aufgedeckten offenen Themen im Stand der Forschung der multikriteriellen Handoverentscheidung (siehe Abschnitt 3.5) wie schwache Anwendungssensitivität und mangelhafte Flexibilität hinsichtlich Definition und Parametrierung der für die Handoverentscheidung relevanten Informationssätze.

Die Grundlage des FLASHED-Frameworks bildet der MCDM-Prozess. Darüber hinaus wurden im FLASHED-Framework folgende Funktionalitäten implementiert:

- flexible Konfiguration der Handoverentscheidung in Bezug auf Definition und Parametrierung der für Handoverentscheidung relevanten Informationssätze
- Berücksichtigung aktiver Anwendungen und deren Anforderungen hinsichtlich Entscheidungskriterien
- Berücksichtigung von verschiedenen Perspektiven: Zwei relevante Perspektiven sind die des Nutzers und des Netzbetreibers
- drei Algorithmen zur Alternativenbewertung wie ORA, AORA und *Load Balancing Algorithm* (beschrieben jeweils in Abschnitten 4.2, 4.3 und 5.2.4)

Das FLASHED-Framework setzt sich aus einem passiven und einem aktiven Teil zusammen. Der passive Teil dient als Container für die Konfigurationsparameter und wurde als Datenbank realisiert. Der aktive Teil umfasst die Implementierung der Entscheidungsalgorithmen und die Schnittstellen für die Kommunikation mit OMNeT++/INET und mit der Datenbank. Der aktive Teil wurde in Java implementiert und wird im Weiteren als FLASHED-Backend bezeichnet. Das FLASHED-Backend wurde in ein ausführbares Java-Archive exportiert, welches einen bestimmten Satz an Eingangsdaten (aufgelistet in Tabelle 5.20) als Argumente akzeptiert und eine Rangliste der Alternativen zurückgibt.

Das FLASHED-Framework lässt sich auch in reale Kommunikationsumgebungen integrieren. Es müsste in diesem Fall über das Kernnetz des Netzbetreibers erreichbar gemacht werden, und es kann auf einem Server innerhalb oder außerhalb des Kernnetzes platziert werden. Auf den Endgeräten wird eine Handoveranwendung vonnöten sein, bei der die Handoverphasen Netzwerksuche und Handoverausführung implementiert sind. Die Entscheidungsphase wird dabei vom FLASHED-Framework durchgeführt. Die Handoveranwendung auf dem Endgerät muss in der Lage sein, die Eingangsdaten, gemäß Tabelle 5.20 zu sammeln und an das FLASHED-Framework zu senden. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass die Handoveranwendung die vom FLASHED-Framework berechnete Rangliste der Alternativen interpretieren kann. Zusätzlich wird ein Netzwerkdienst auf dem Server mit dem FLASHED-Framework nötig sein, der als Vermittler zwischen den Endgeräten und dem FLASHED-Framework agiert.

## 5.2 Konzipierung des FLASHED-Frameworks

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem prinzipiellen Aufbau des Frameworks. Zu Beginn des Abschnittes werden logische Komponententypen und deren Implementierung



in einer Datenbank erläutert. Außerdem werden die Algorithmen für eine lastverteilungsorientierte Handoverentscheidung und eine anwendungssensitive Parametrierung der Ziele und der Kriterien vorgestellt. Weiterhin wird eine Untersuchung der MCDM-Methoden hinsichtlich der Berechnung von Gesamtnutzwerten präsentiert. Danach geht es zu der Vorstellung eines neuartigen multikriteriellen, anwendungs- und perspektivensensitiven Handover-Entscheidungsalgorithmus über. Am Ende des Abschnittes wird der Aufbau und die Funktionsweise des Frameworks anhand einer Fallstudie veranschaulicht.

### 5.2.1 Festlegung von Komponententypen für das FLASHED-Framework

In Abbildung 5.1 wird die Festlegung der sogenannten logischen Komponententypen dargestellt. Ein logischer Komponententyp stellt einen Datencontainer dar, in dem logisch zusammenhängende und für die Handoverentscheidung relevante Informationen gespeichert werden können. Aus den MCDM-Prozessschritten wurden Komponententypen wie *Goal*, *Criterion* und *Algorithm* abgeleitet. Für die in Abschnitt 5.1 gesetzten Ziele wie die Berücksichtigung verschiedener Perspektiven und die Anwendungssensitivität wurden folgende zwei zusätzliche Komponententypen definiert: *Perspective* und *Application*. Um eine nutzerspezifische Konfiguration des Frameworks zu ermöglichen, wurde ein weiterer Komponententyp namens *User* eingeführt.

Wie Abbildung 5.1 zeigt, wurde der Komponententyp *Criteria* für eine bessere Flexibilität hinsichtlich der Konfiguration der Kriterien in weitere Komponententypen *Criterion\_basic* und *Criterion\_specific* aufgeteilt. *Criterion\_basic* ist für die Basiskonfiguration der Kriterien vorgesehen. Dagegen ist *Criterion\_specific* für die Festlegung der nutzerspezifischen Kriterien gedacht, die auf *Criterion\_basic* aufbauen.

Um die in Abschnitt 5.1 angesprochene Anwendungssensitivität zu ermöglichen, wurde der Komponententyp *Application* in vier Teile gegliedert:

- *Application* – Konfiguration der Anwendungsparameter,
- *Application\_type* – Konfiguration der Anwendungstypen,
- *Goal\_per\_app* und *Criterion\_specific\_per\_app* – anwendungsspezifische Konfiguration der Ziele und der Kriterien.

Der Komponententyp *Algorithm* wurde seinerseits in zwei Elemente *Algorithm* und *Algorithm\_and\_goal* geteilt. In *Algorithm* werden die Entscheidungsalgorithmen gespeichert. Der Komponententyp *Algorithm\_and\_goal* gilt als ein Verbindungsglied zwischen den Komponententypen *Algorithm* und *Goal*. Dabei können jedem Algorithmus mehrere Ziele zugewiesen werden.

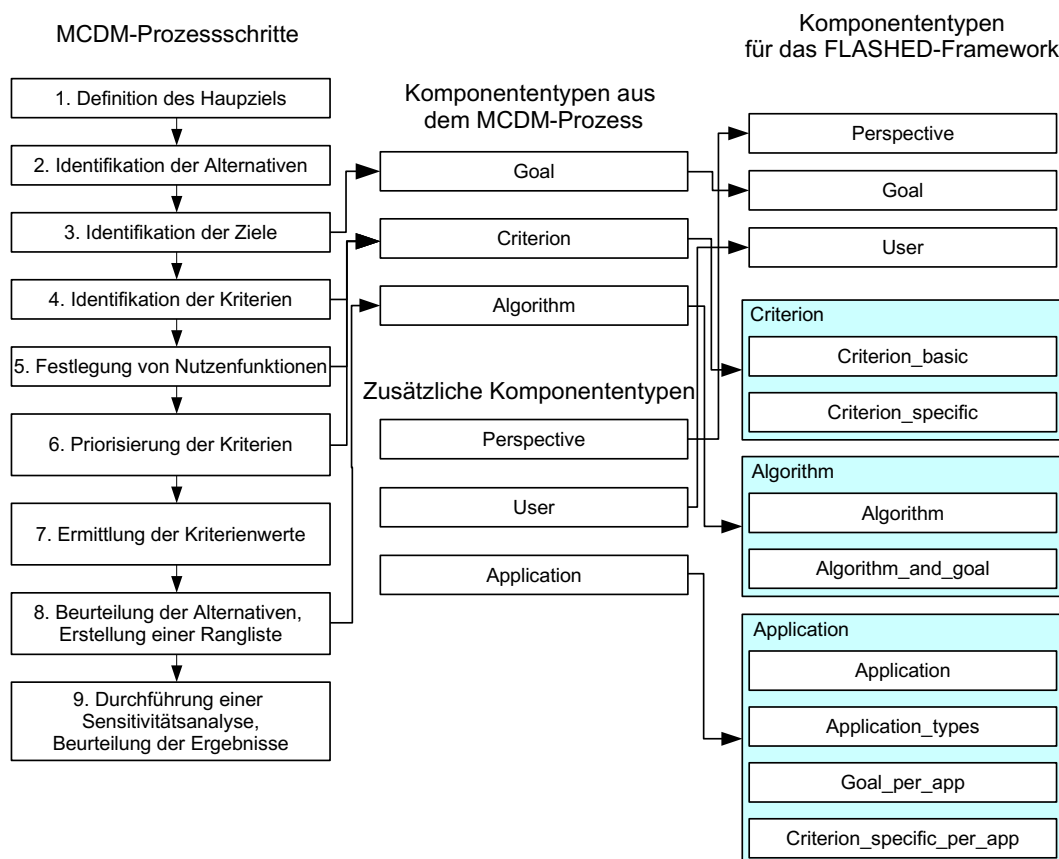


Abbildung 5.1: MCDM-Prozessschritte nach [GeLe14] (links) und die Ableitung der Komponententypen für das FLASHED-Framework

### 5.2.2 FLASHED-Datenbank, Aufbau der Komponententypen und deren Beziehungen untereinander

Für die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Komponententypen wurde eine Datenbank implementiert, in der für jeden Komponententyp eine Datenbanktabelle definiert wurde. Somit dienen die Datenbanktabellen als Container für die Komponententypen. Die Strukturen und die Beziehungen der Datenbanktabellen sind als *Enhanced Entity-Relationship Model* (EER-Modells) in Abbildung 5.2 dargestellt. Diese Datenbank wird im Weiteren als FLASHED-Datenbank bezeichnet. Tabelle 5.1 präsentiert die Struktur der Datenbanktabellen inklusive Deutungen ihrer Felder.

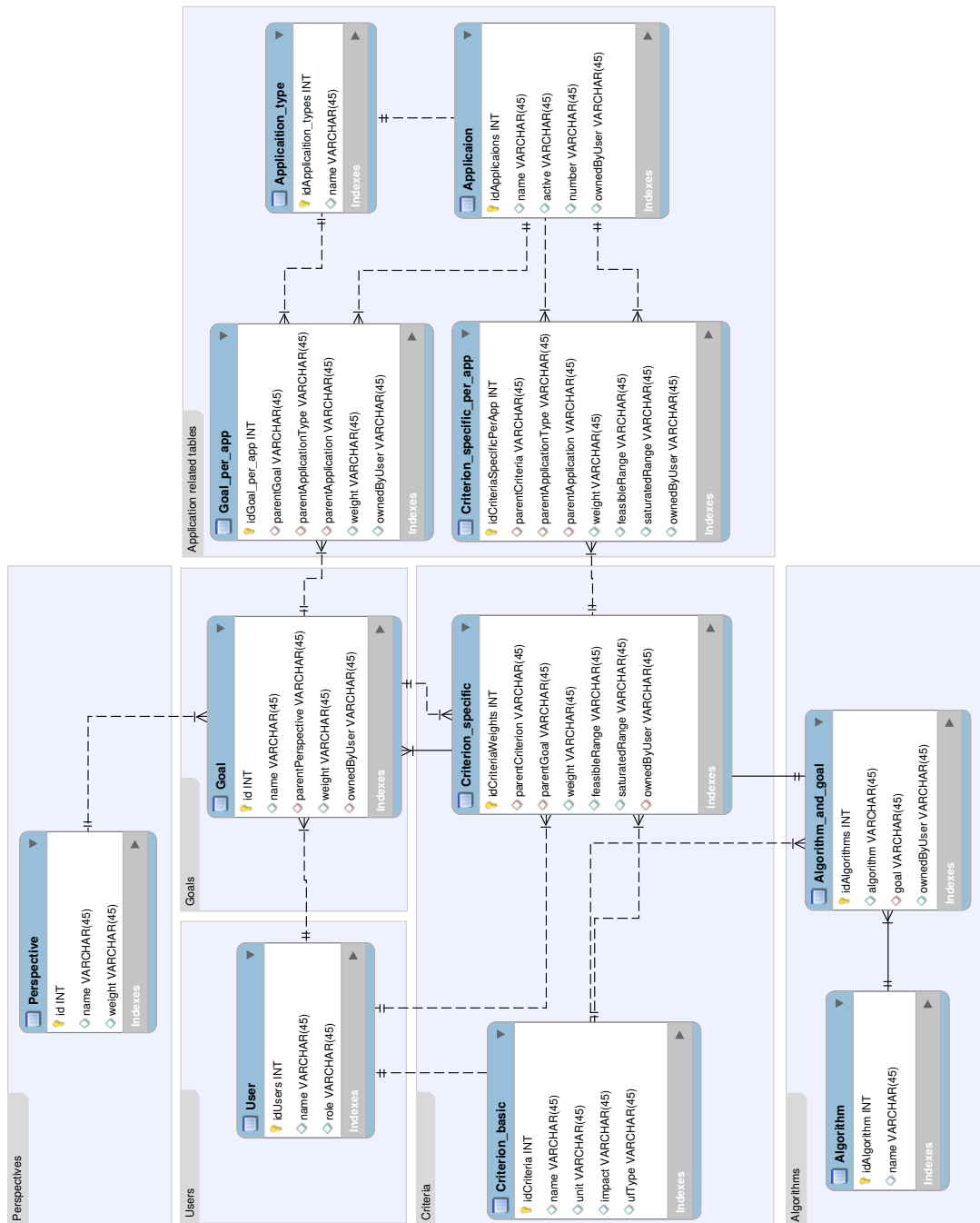


Abbildung 5.2: EER-Modell der FLASHED-Datenbank

### 5.2.3 FLASHED-Datenbank gefüllt mit Beispielkomponenten

In Abbildung 5.3 ist die mit Beispielkomponenten gefüllte FLASHED-Datenbank schematisch dargestellt. Dabei geht es um zwei Perspektiven: Nutzer- und Netzwerk-betreiber-Perspektive. Jeder Perspektive sind Ziele untergeordnet. Die Ziele werden von mehreren Kriterien charakterisiert. Die Kriterien fließen dann in die Entscheidungsalgorithmen ein. Jeder der drei Entscheidungsalgorithmen berechnet für jede Alternative einen Gesamtnutzwert. Der sogenannte aggregierte Gesamtnutzwert wird als gewichtete Summe von Gesamtnutzwerten aller Entscheidungsalgorithmen für jede Alternative kalkuliert.

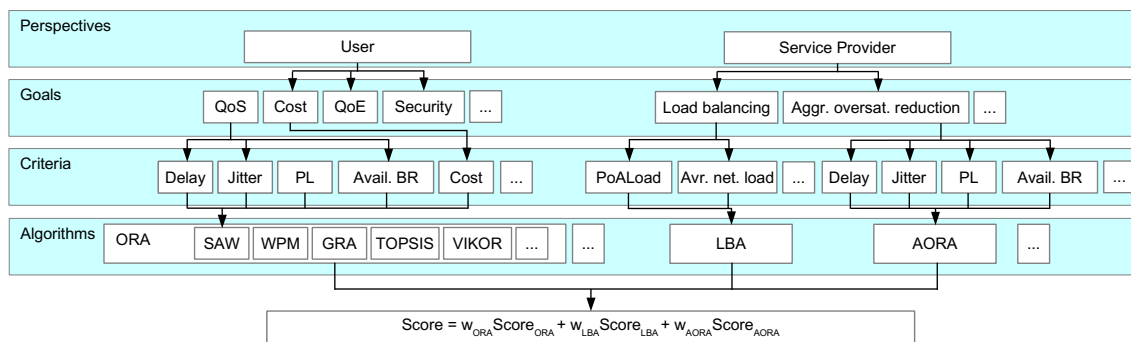


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der FLASHED-Datenbank mit Beispielkomponenten. Die Variablen  $w_{\text{ORA}}$ ,  $w_{\text{LBA}}$  und  $w_{\text{AORA}}$  repräsentieren Gewichte von jeweiligen Entscheidungsalgorithmen.

### 5.2.4 Lastverteilungsorientierter Handover-Entscheidungsalgorithmus

Das Ziel der Lastverteilung in Kommunikationssystemen ist nach [IqSB86] die Verbesserung der Verteilung verschiedener Arbeitsvorgänge über eine Menge der Rechenressourcen verschiedener Art wie zum Beispiel Computercluster, Kommunikationswege, Prozessoren oder Datenspeicher.

Lastverteilungsorientierte Algorithmen bilden eine spezielle Gruppe der Handover-Entscheidungsalgorithmen. Diese Algorithmen streben eine gleichmäßige Verteilung der Last im Netzwerk durch entsprechende Wahl der Kommunikationswege beim Handover an. Als Last wird in diesem Kontext meistens der Datenverkehr berücksichtigt.

In diesem Abschnitt vorgestellter Handover-Entscheidungsalgorithmus bewertet Kommunikationswege basierend auf einem Lastverteilungskoeffizient. Es wird derjenige Kommunikationsweg gewählt, der den höchsten Lastverteilungskoeffizient liefert. Für die Berechnung des Lastverteilungskoeffizientes wurde Formel (5.1) aus [ChJa89] leicht modifiziert. Für Formel (5.1) gilt Folgendes:  $i$  ist Index eines PoA,  $B_i$  ist die

| <b>Tabelle</b>                    | <b>Feld</b>           | <b>Fremdschlüssel</b><br>[Tabellenname:Feld] | <b>Bedeutung</b>  |
|-----------------------------------|-----------------------|--|---|
| <i>User</i>                       | name                  |  | Nutzername  |
|                                   | role                  |  | Nutzergruppe. Zwei Optionen sind möglich: <i>user</i> und <i>admin</i> .  |
|                                   |                       |  |   |
| <i>Perspective</i>                | name                  |  | Perspektivenname  |
|                                   | weight                |  | Gewicht   |
| <i>Goal</i>                       | name                  |  | Zielname  |
|                                   | parentPerspective     | Perspective:name                             | Elternperspektive   |
|                                   | weight                |  | Gewicht   |
| <i>Criterion_basic</i>            | ownedByUser           | User:name                                    | Nutzername des Besitzers  |
|                                   | name                  |  | Kriteriumname   |
|                                   | unit                  |  | Messeinheit   |
|                                   | impact                |  | Typ des Kriteriums hinsichtlich seiner Auswirkung auf den Nutzwert. Zwei Optionen sind möglich: <i>cost</i> für ein Kostenkriterium und <i>benefit</i> für ein Wertekriterium |
|                                   | ufType                |  | Normierungsmethode  |
|                                   |                       |  |   |
| <i>Criterion_specific</i>         | name                  |  | Kriteriumname   |
|                                   | parentCriterion       | Criterion_basic:name                         | Elternkriterium   |
|                                   | parentGoal            | Goal:name                                    | Elternziel  |
|                                   | weight                |  | Gewicht   |
|                                   | feasibleRange         |  | zulässiger Wertebereich   |
|                                   | saturatedRange        |  | gesättigter Wertebereich  |
| <i>Algorithm</i>                  | ownedByUser           | User:name                                    | Nutzername des Besitzers  |
|                                   | name                  |  | Algorithmusname   |
|                                   | algorithm             | Algorithm:name                               | Algorithmusname   |
|                                   | goal                  | Goal:name                                    | Zielname  |
| <i>Algorithm_and_goal</i>         | ownedByUser           | User:name                                    | Nutzername des Besitzers  |
|                                   | name                  |  | Anwendungstyp   |
|                                   |                       |  |   |
| <i>Application</i>                | name                  |  | Anwendungsname  |
|                                   | parentApplicationType | Application_type:name                        | Elternanwendungstyp   |
|                                   | parentGoal            | Goal:name                                    | Elternziel  |
| <i>Goal_per_app</i>               | parentApplicationType | Application_type:name                        | Elternanwendungstyp   |
|                                   | parentApplication     | Application:name                             | Elternanwendung   |
|                                   | weight                |  | Gewicht   |
|                                   | ownedByUser           | User:name                                    | Nutzername des Besitzers  |
| <i>Criterion_specific_per_app</i> | parentCriterion       | Goal:name                                    | Elternziel  |
|                                   | parentApplicationType | Application_type:name                        | Elternanwendungstyp   |
|                                   | parentApplication     | Application:name                             | Elternanwendung   |
|                                   | weight                |  | Gewicht   |
|                                   | feasibleRange         |  | zulässiger Wertebereich   |
|                                   | saturatedRange        |  | gesättigter Wertebereich  |
|                                   | ownedByUser           | User:name                                    | Nutzername des Besitzers  |
|                                   |                       |  |   |

Tabelle 5.1: Tabellenstruktur der FLASHED-Datenbank

absolute Verkehrslast des  $i$ -ten PoA und  $N$  ist die Anzahl von PoA. Da der LBA im Hinblick auf eine Infrastruktur mit PoA mit unterschiedlichen maximalen Bitraten entwickelt wurde, wurde hier nicht die absolute Verkehrslast  $B$  wie in Formel (5.1), sondern eine relative Verkehrslast  $RelPoALoad$  von PoA verwendet. LBA weist die erforderliche Bitrate der aktiven Anwendungen jeder Alternative nacheinander zu. Währenddessen wird über alle Alternativen der Lastverteilungskoeffizient berechnet. Die Alternative, die dabei den höchsten Lastverteilungskoeffizient liefert, gilt als beste Lösung.

$$L = \frac{\left(\sum_{i=0}^N B_i\right)^2}{N \sum_{i=0}^N (B_i)^2} \quad (5.1)$$

LBA erwartet folgende Eingangsdaten:

- Alternativen  $A$  (PoA) und deren Charakteristiken wie aktuelle Last ( $PoALoad$ ) und maximal verfügbare Bitrate ( $PoAMaxBR$ ), vorgestellt in Tabelle 5.2,

| <b>A</b> | <b>PoALoad</b> | <b>PoAMaxBR</b> |
|----------|----------------|-----------------|
|          | Mbit/s         | Mbit/s          |
| $a_1$    | $x_{11}$       | $x_{12}$        |
| $a_2$    | $x_{21}$       | $x_{22}$        |
| ...      | ...            | ...             |

Tabelle 5.2: Alternativen und Kriterienkonfiguration

- erforderliche Bitrate für aktive Anwendungen der MS:  $Req\_BR$  [Mbit/s].

Der LBA besteht im Wesentlichen aus folgenden zwei Schritten:

*Schritt 1:* Das Herausfinden von zulässigen Alternativen  $\hat{A} \subset A$  nach (5.2). Hier werden die PoA aussortiert, die nicht genug verfügbare Bitrate für die MS und darauf laufenden Anwendungen anbieten können. Dabei ist  $c$  der Index des PoA, mit dem die MS aktuell assoziiert ist, demzufolge ist  $a_c$  der assoziierte PoA.

$$\hat{A} = \begin{cases} a_i \in A, & \text{falls } i = c \\ a_i \in A, & \text{falls } i \neq c \wedge PoAMaxBR_i - PoALoad_i - Req\_BR_i \geq 0 \end{cases}, \quad i \in I \quad (5.2)$$

*Schritt 2:* Die Berechnung des relativen Lastverteilungskoeffizienten  $L_i$  für jede zulässige Alternative  $\hat{A} = \{a_i | i \in \hat{I}\}$ . Dabei ist  $\hat{I} \subset I$  eine Indexmenge aller zulässigen Alternativen. Diese Berechnung erfolgt nach Formel (5.3), wobei  $RelPoALoad_n$  nach

Formel (5.4) bestimmt wird. Dabei wird die Alternative mit Index  $i$ , für die nach Formel (5.3) der Lastverteilungskoeffizient berechnet wird, in folgenden Erklärungen als Kandidatalternative bezeichnet. Bei der Berechnung von  $RelPoALoad_n$ , wie Formel (5.4) veranschaulicht, wird zwischen vier Fällen unterschieden. Abhängig davon, ob es um:

- eine Kandidatalternative ( $n = i$ ) oder um
- keine Kandidatalternative ( $n \neq i$ )

und um

- einen assoziierten AP ( $n = c$ ) oder um
- keinen assoziierten AP ( $n \neq c$ )

geht, wird die erforderliche Bitrate der aktiven Anwendungen des MSs ( $Req\_BR$ ) bei Berechnung von  $RelPoALoad$  berücksichtigt oder weggelassen.

$$L_i = \frac{\left( \sum_{n \in \hat{I}} RelPoALoad_n \right)^2}{|\hat{I}| \sum_{n \in \hat{I}} (RelPoALoad_n)^2}, \quad i \in \hat{I} \quad (5.3)$$

$$RelPoALoad_n = \begin{cases} \frac{PoALoad_n}{PoAMaxBR_n}, & \text{falls } n = i \wedge n = c \\ \frac{PoALoad_n + Req\_BR}{PoAMaxBR_n}, & \text{falls } n = i \wedge n \neq c \\ \frac{PoALoad_n - Req\_BR}{PoAMaxBR_n}, & \text{falls } n \neq i \wedge n = c \\ \frac{PoALoad_n}{PoAMaxBR_n}, & \text{falls } n \neq i \wedge n \neq c \end{cases} \quad (5.4)$$

### 5.2.5 Untersuchung der Gesamtnutzwerte berechnet mit diversen Algorithmen und MCDM-Methoden

Wie in Abbildung 5.3 und in Formel (5.5) dargestellt, ist der sogenannte aggregierte Gesamtnutzwert einer Alternative eine gewichtete Summe von Gesamtnutzwerten berechnet mit Entscheidungsalgorithmen ORA, AORA und LBA.

$$Score = w_{ORA} Score_{ORA} + w_{AORA} Score_{AORA} + w_{LBA} Score_{LBA} \quad (5.5)$$

Um eine Aussage über die Einflüsse der Gesamtnutzwerte der einzelnen Entscheidungsalgorithmen auf den aggregierten Gesamtnutzwert treffen zu können, werden

Wertebereiche und Werteverteilung der Gesamtnutzwerte einzelner Entscheidungsalgorithmen analysiert. Als Gesamtnutzwert bei AORA werden die Werte von *optToDegDiff* genommen, die sich im Bereich  $[0, 1]$  befinden (beschrieben in Abschnitt 4.3). Im Falle von LBA wird als Gesamtnutzwert der Lastverteilungsindex benutzt, der ebenfalls im Bereich  $[0, 1]$  liegt (beschrieben in Abschnitt 5.2.4). Bei ORA ist es etwas komplizierter, da hier verschiedene MCDM-Methoden zum Einsatz kommen können. Im Rahmen der Recherche für diese Dissertation wurden keine Studien über einen Vergleich der von MCDM-Methoden berechneten Gesamtnutzwerten im Hinblick auf deren Wertebereiche und Werteverteilungen gefunden. Deswegen wurden die MCDM-Methoden WSM, WPM, TOPSIS, GRA, VIKOR bezüglich Wertebereiche und Werteverteilung der von ihnen berechneten Gesamtnutzwerte untersucht. Im Folgenden wird die Untersuchung und ihre Ergebnisse beschrieben.

Für die Untersuchung wurde eine Testumgebung in Form einer Java-Klasse entwickelt. Diese Java-Klasse macht es möglich, eine multikriterielle Bewertung von Kommunikationswegen mit ändernden Kriterienwerten durchzuführen. Dabei werden die Kriterienwerte bei jedem Durchlauf schrittweise erhöht. Für diese Untersuchung wurden vier Szenarien definiert.

Die ersten zwei Szenarien nutzen fünf Kriterien, deren Konfiguration in Tabelle 5.3 vorgestellt wird. Beide Szenarien nutzen gleiche zulässige Bereiche und gleiche Nutzenfunktionen für ihre Kriterien. Die Szenarien unterscheiden sich lediglich in den Gewichten der Kriterien. Das Szenario I hat gleiche Gewichte für alle Kriterien. Bei Szenario II wird für die Kriteriengewichte eine geometrischen Reihenfolge mit dem Quotient 2,8411 genommen (siehe Tabelle 5.3). Für Szenarien III und IV werden zehn Kriterien verwendet (siehe Tabelle 5.4). Beide Szenarien nutzen identische zulässige Bereiche und Nutzenfunktionen für die Kriterien. Für das Szenario III werden Gewichte für alle Kriterien auf den gleichen Wert gesetzt, beim Szenario IV dagegen wird für die Kriteriengewichte eine geometrische Reihenfolge mit dem Quotient 1,474 verwendet. Die Quotienten für die geometrischen Reihenfolgen für die Szenarien II und IV werden jeweils auf 2,8411 und 1,474 gesetzt, damit die Summe der Gewichte gleich eins ist.

Ein Kommunikationsweg wurde simuliert. Die Werte aller Kriterien wurden am Anfang der Simulationen auf 5 % der zulässigen Bereiche gesetzt. Das heißt, dass die Kriterien Verzögerung, Jitter und Kosten folgende Werte erhielten: 25, 5, 5. Die restlichen Kriterien bekamen Wert 10.

Für jedes Szenario wurden neunzehn Durchläufe durchgeführt. Bei jedem Durchlauf wurde der Gesamtnutzwert des Kommunikationsweges mittels jeden der Algorithmen WSM, WPM, TOPSIS, GRA und VIKOR berechnet. Dabei wurden bei jedem Durchlauf die Kriterienwerte jedes Kriteriums um 5 % jeweiliges Wertebereiches erhöht.



|                             | Verzögerung         | Jitter              | Kosten              | Krit4               | Krit5               |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Allgemeine Parameter</b> |                     |                     |                     |                     |                     |
| Zulässiger Wertebereich     | 0–500, ms           | 0–100, ms           | 0–100, C/MByte      | 0–200               | 0–200               |
| Nutzenfunktion              | $\frac{500-x}{500}$ | $\frac{100-x}{100}$ | $\frac{100-x}{100}$ | $\frac{200-x}{200}$ | $\frac{200-x}{200}$ |
| <b>Szenario I</b>           |                     |                     |                     |                     |                     |
| Gewicht, [0, 1]             | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 | 0,2                 |
| <b>Szenario II</b>          |                     |                     |                     |                     |                     |
| Gewicht, [0, 1]             | 0,01                | 0,0284              | 0,0807              | 0,2293              | 0,6515              |

Tabelle 5.3: Parametrierung der Kriterien

|                             | Verz.               | Jitter              | Kosten              | Krit4               | Krit5               | Krit6               | Krit7               | Krit8               | Krit9               | Krit10              |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Allgemeine Parameter</b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Zulässiger Wertebereich     | 0–500, ms           | 0–100, ms           | 0–100, C/MByte      | 0–200               | 0–200               | 0–200               | 0–200               | 0–200               | 0–200               | 0–200               |
| Nutzenfunktion              | $\frac{500-x}{500}$ | $\frac{100-x}{100}$ | $\frac{100-x}{100}$ | $\frac{200-x}{200}$ | $\frac{200-x}{200}$ | $\frac{200-x}{200}$ | $\frac{200-x}{200}$ | $\frac{200-x}{200}$ | $\frac{200-x}{200}$ | $\frac{200-x}{200}$ |
| <b>Szenario III</b>         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Gewicht, [0, 1]             | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 | 0,1                 |
| <b>Szenario IV</b>          |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Gewicht, [0, 1]             | 0,01                | 0,0147              | 0,0217              | 0,0320              | 0,0472              | 0,0695              | 0,1025              | 0,1511              | 0,2228              | 0,3284              |

Tabelle 5.4: Parametrierung der Kriterien

Somit waren die Werte aller Kriterien beim neunzehnten Durchlauf auf Maximum deren zulässigen Bereiche gesetzt.

Die berechneten Gesamtnutzwerte für neunzehn Durchläufe für alle vier Szenarien sind in den Diagrammen 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 und in den Tabellen A.1, A.2, A.3, A.4 in Anhang A dargestellt. Die Diagramme und Tabellen veranschaulichen die Unterschiede in den Wertebereichen und in der Werteverteilung für die analysierten Algorithmen. Die Verteilung der Gesamtnutzwerte von WSM und WPM sind identisch für alle vier Szenarien und verlaufen im ganzen Wertebereich linear. Die Werteverteilung von distanzbasierten Algorithmen TOPSIS, GRA und VIKOR weichen von den Ergebnissen von WSM und WPM stark ab und sind für jedes Szenario unterschiedlich.

Diese unterschiedliche Verteilung der Gesamtnutzwerte der MCDM-Methoden wird je nach eingesetzter MCDM-Methode zu einem anderen Einfluss von ORA auf das Gesamtnutzwert der Alternativen zur Folge haben. Somit können die Entscheidungsergebnisse bei der Verwendung unterschiedlicher MCDM-Methoden stark voneinander abweichen. Dieser Aspekt muss bei der Konfiguration der Handoverentscheidung im FLASHED-Framework berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich die Konfiguration der Gewichte der Algorithmen bzw. der Perspektiven und der Ziele in der FLASHED-Datenbank für jede MCDM-Methode einzeln vorzunehmen.

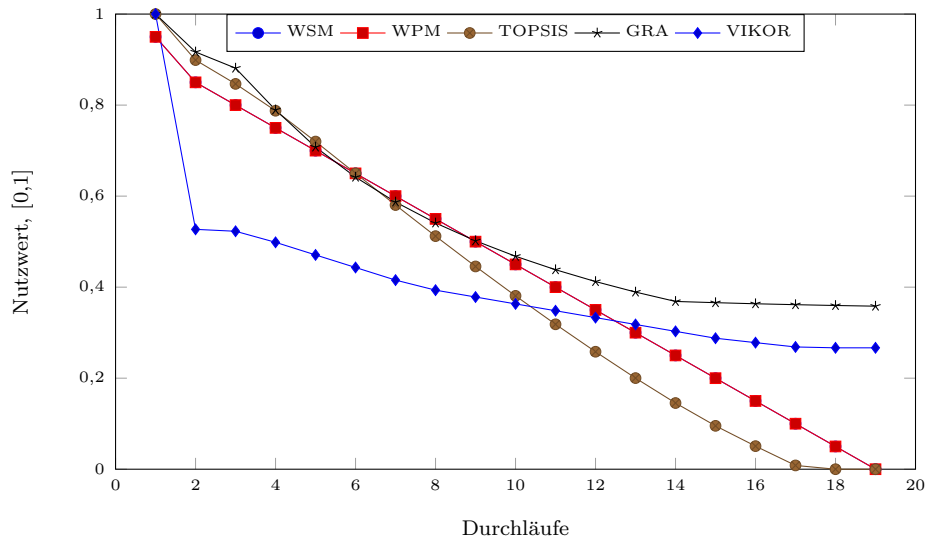


Abbildung 5.4: Die Gesamtnutzwerte verschiedener MCDM-Methoden für das Szenario I nach Tabelle 5.3.

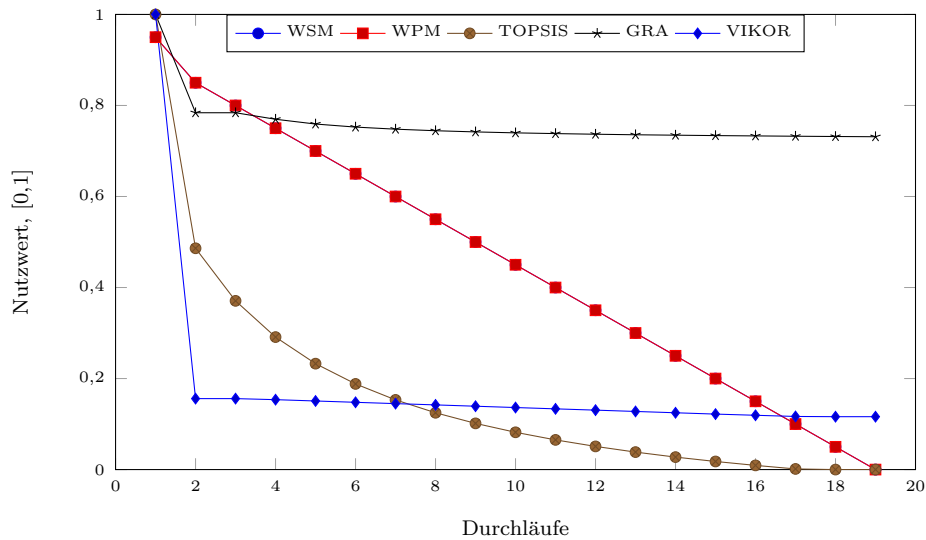


Abbildung 5.5: Die Gesamtnutzwerte verschiedener MCDM-Methoden für das Szenario II nach Tabelle 5.3.

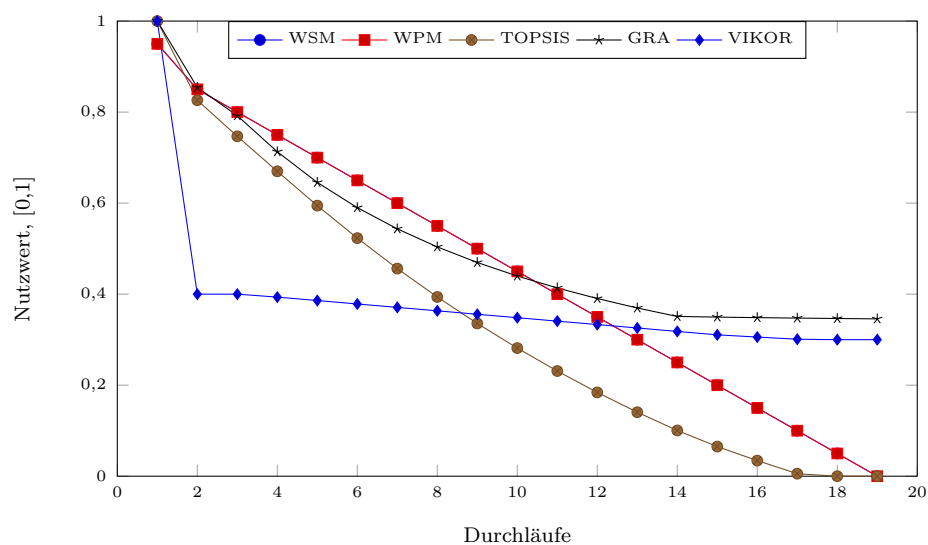


Abbildung 5.6: Die Gesamtnutzwerte verschiedener MCDM-Methoden für das Szenario III nach Tabelle 5.4.

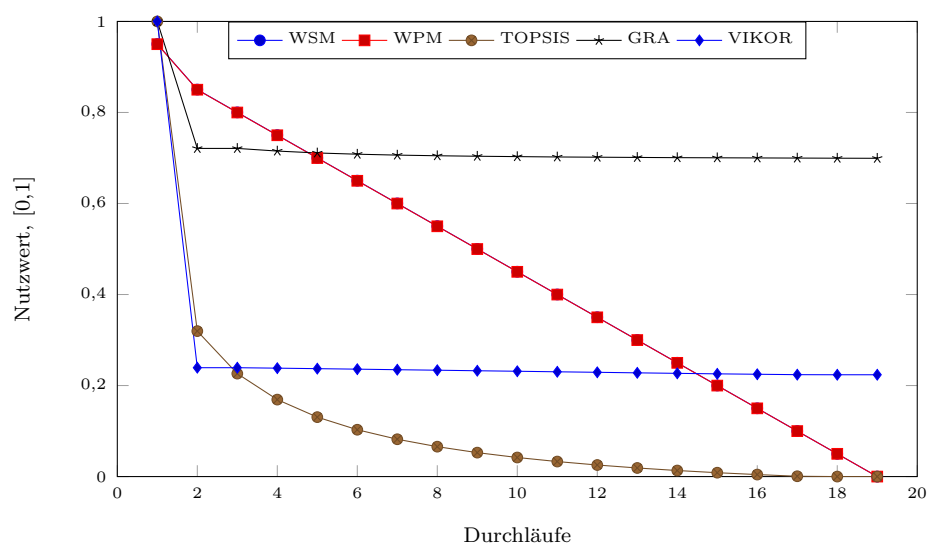


Abbildung 5.7: Die Gesamtnutzwerte verschiedener MCDM-Methoden für das Szenario IV nach Tabelle 5.4.

### 5.2.6 Anwendungsspezifische Parametrierung der Ziele und Kriterien

Jede Anwendung kann ihre spezifischen Anforderungen an Kommunikationsnetze und mobiles Endgerät haben. Demzufolge ist die Parametrierung der Entscheidungskriterien in Abhängigkeit von Anwendungsanforderungen sinnvoll. In den meisten vorgeschlagen Lösungen für Handoverentscheidungen wird eine Kriterienparametrierung für eine bestimmte Anwendung oder einen Anwendungstyp vorgeschlagen. In realistischen Fällen sind aber oft mehrere Anwendungen gleichzeitig auf einem Endgerät aktiv. In diesem Abschnitt wird ein Algorithmus für eine anwendungsspezifische Parametrierung der in oberen Abschnitten vorgestellten logischen Komponententypen Ziel und Kriterium vorgeschlagen.

Die Konfiguration der Anwendungen, Anwendungstypen, die anwendungsspezifische Konfiguration der Ziele und Kriterien wird jeweils in den Tabellen *Application*, *Application\_type*, *Goal\_per\_app* und *Criteria\_per\_app* gespeichert. Vor jeder Handoverentscheidung basierend auf den Daten aus diesen Tabellen wird eine anwendungsspezifische Parametrierung der Ziele und Kriterien durchgeführt.

Die Routine für die anwendungsspezifische Parametrierung der Ziele und der Kriterien wurde in Java implementiert, und ihre Struktur ist im Blockdiagramm in Abbildung 5.8 dargestellt. Im ersten Schritt wird die Liste mit allen aktiven Anwendungen erstellt. Danach wird eine Liste mit Zielen und eine Liste mit Kriterien mit den Daten aus der Datenbank gefüllt. Als Nächstes werden pro Anwendung die Konfigurationsparameter für jedes Ziel in den Tabellen *Goal\_per\_app* und *Goal* gesucht. Dabei wird zuerst nach anwendungsspezifischen Konfigurationsparametern in Tabelle *Goal\_per\_app* geschaut. Wenn kein Eintrag gefunden wird, wird nach einem Eintrag für den Anwendungstyp der jeweiligen Anwendung und dem jeweiligen Ziel gesucht. Jeder gefundene Eintrag wird in ein Ziel-Objekt gespeichert und in die Liste der Ziel-Objekte geschrieben. Wenn beide Suchvorgänge erfolglos bleiben, wird der Eintrag für die jeweilige Anwendung und das jeweilige Ziel aus der Tabelle *Goal* geholt. Am Ende entsteht pro Anwendung eine Liste mit Ziel-Objekten, wo jedes Ziel-Objekt die Konfiguration des Zieles für die jeweilige Anwendung enthält. Auf die gleiche Art und Weise werden die Konfigurationsparameter der Kriterien pro Anwendung ermittelt. Am Ende wird für jede Anwendung eine Liste mit anwendungsspezifischen Kriterien-Objekten erstellt.

Im letzten Schritt werden anwendungsspezifische Listen mit den Ziel- und Kriterien-Objekten über alle Anwendungen zusammengesetzt. Jedes Ziel hat einen einzigen Konfigurationsparameter Gewicht. Deswegen besteht die Zusammensetzung der Konfigurationsparameter für Ziele lediglich in der Berechnung eines Mittelwertes für jedes

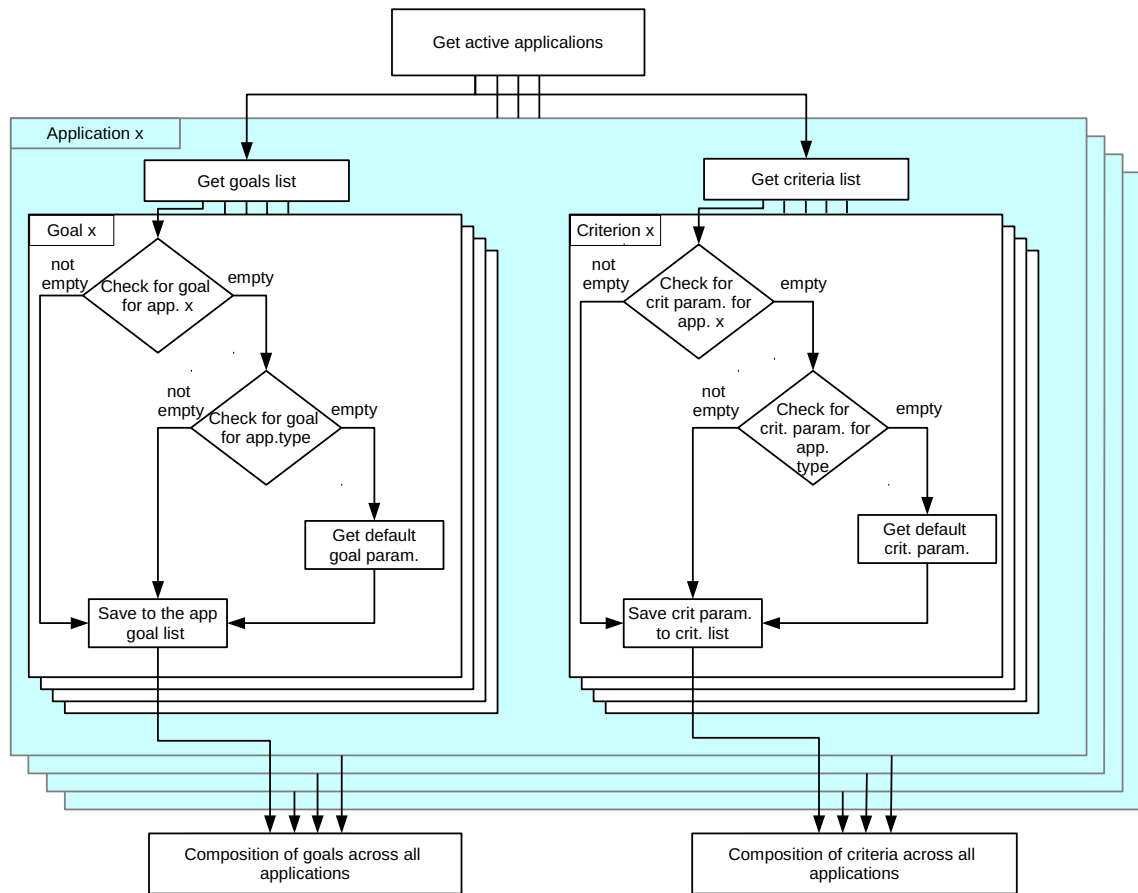


Abbildung 5.8: Anwendungsspezifische Parametrierung der Ziele und der Kriterien

Ziel über alle Anwendungen. Die Zusammensetzung der Konfigurationsparameter von Kriterien ist etwas komplexer und erfolgt für jedes Kriterium über alle Anwendungen nach Matrix aus Tabelle 5.5.

Somit ist das Ergebnis dieses Algorithmus eine Liste der Ziele und eine Liste der Kriterien, die in Abhängigkeit von aktiven Anwendungen parametrier sind.

| Kriterien          | Gewicht      | Zulässiger Bereich | Gesättigter Bereich |
|--------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| Verzögerung        | Durchschnitt | Schnittmenge       | Schnittmenge        |
| Jitter             | Durchschnitt | Schnittmenge       | Schnittmenge        |
| Paketverlustrate   | Durchschnitt | Schnittmenge       | Schnittmenge        |
| Verfügbare Bitrate | Durchschnitt | $FeasRanSum^*$     | $SatRanSum^{**}$    |
| Kosten             | Durchschnitt | Schnittmenge       | Schnittmenge        |

Tabelle 5.5: Zusammensetzungsregeln für verschiedene Kriterienparameter. \* – die Summe der unteren Grenzen der zulässigen Bereiche  $x_{fmin}$ . \*\* – die Summe der unteren Grenzen der gesättigten Bereiche  $x_{smin}$

### 5.2.7 Entscheidungsalgorithmus für FLASHED-Framework

Das Herzstück des FLASHED-Frameworks ist ein neuartiger Handover-Entscheidungsalgorithmus, der sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet: Berücksichtigung von mehreren Kriterien, Anwendungssensitivität und Perspektivensensitivität inklusive Verwendung verschiedener Algorithmen für die Alternativenbewertung. In Abbildung 5.9 werden Schritte eines klassischen MCDM-Algorithmus und des vorgeschlagenen Handover-Entscheidungsalgorithmus vorgestellt.

Die Schritte der beiden Algorithmen lassen sich in drei folgende Sektionen einordnen: *Ermittlung von Eingangsdaten*, *Ermittlung von Konfigurationsdaten* und *Berechnungsschritte*. Der klassische MCDM-Algorithmus einschließlich seiner Schritte wurde in Abschnitt 2.2 ausführlich beschrieben.

Im Folgenden werden die Schritte des vorgeschlagenen Handover-Entscheidungsalgorithmus einzeln erklärt. Die erste Sektion *Ermittlung von Eingangsdaten* beinhaltet die Schritte, bei denen es um die Ermittlung der Daten wie Nutzernamen, Liste der aktiven Anwendungen und die Werte der relevanten Kriterien geht. Die Techniken zur Ermittlung der Kriterienwerte wurden in Abschnitt 3.3 vorgestellt. In der Sektion *Ermittlung von Konfigurationsdaten* werden Konfigurationsdaten der Perspektiven, Ziele und Kriterien aus der FLASHED-Datenbank geholt. In der dritten Sektion *Berechnungsschritte* werden basierend auf Eingangsdaten und Konfigurationsdaten weitere Schritte durchgeführt. In Schritten 10 und 11 werden, wie in Abschnitt 5.2.6 beschrieben, anwendungsspezifische Ziel- und Kriterienkonfigurationsparameterwerte jeweils pro Ziel und pro Kriterium zusammengesetzt. Das Ergebnis des Schrittes 11 ist die Liste von entsprechend den Eingangsdaten und Konfigurationsparameter aus der FLASHED-Datenbank parametrisierten Kriterien pro Entscheidungsalgorithmus. Im Schritt 12 werden für jede Alternative die Nutzwerte basierend auf den parametrisierten Kriterien mittels Entscheidungsalgorithmen ORA, AORA und LBA berechnet. Im Schritt 13 werden für jede Alternative die mit ORA, AORA und LBA berechneten Gesamtnutzwerte als gewichtete Summe nach Formel (5.5) zu dem aggregierten Gesamtnutzwert zusammengesetzt. Im letzten Schritt wird eine Rangfolge der Alternativen nach ihren aggregierten Gesamtnutzwerten erstellt. Die Alternative mit dem höchsten aggregierten Gesamtnutzwert gilt als die beste Lösung.

Der Ablauf des vorgeschlagenen Handover-Entscheidungsalgorithmus wird anhand einer Fallstudie in Abschnitt 5.3 vorgestellt.

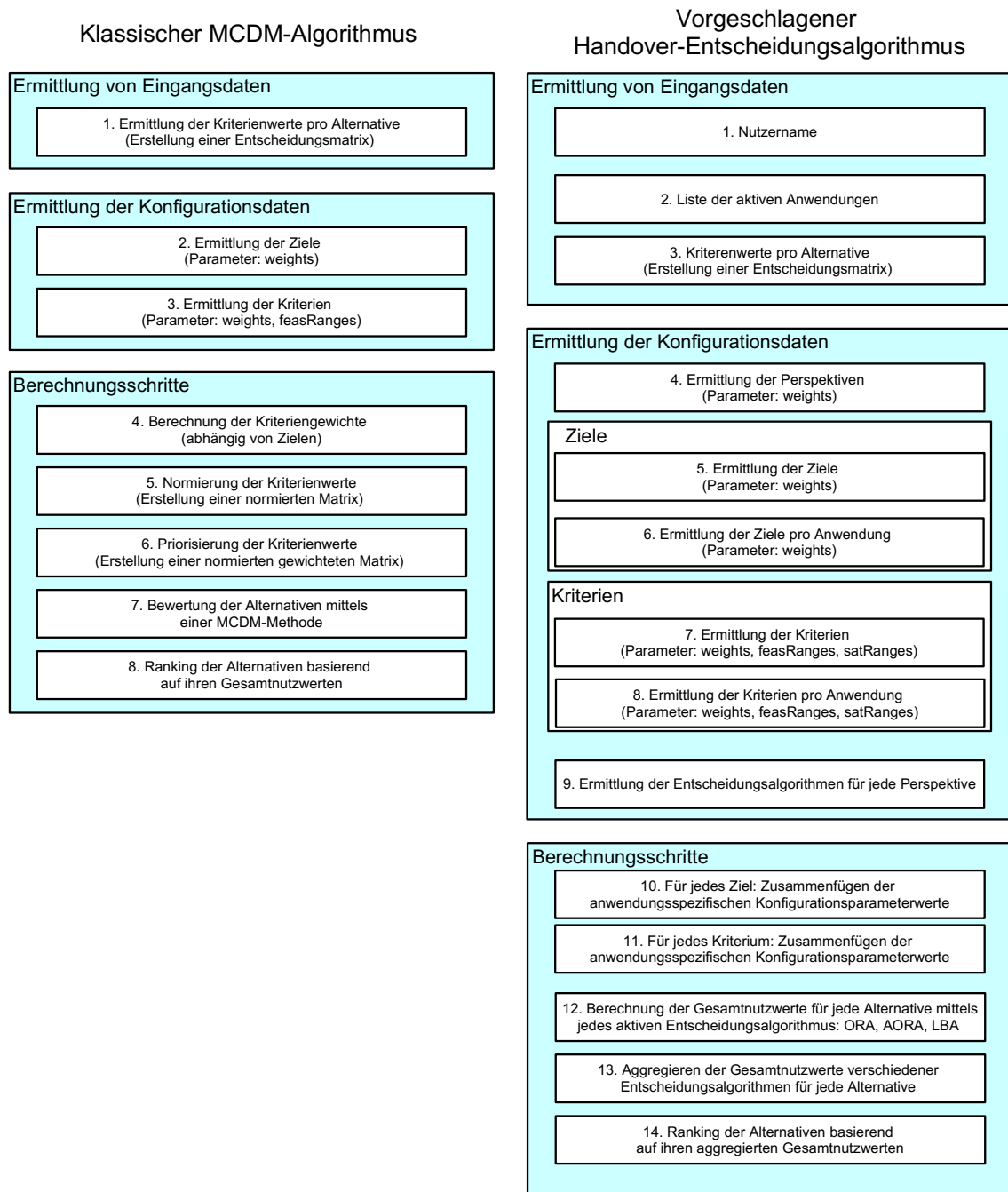


Abbildung 5.9: Der klassische MCDM-Algorithmus und der vorgeschlagene Handover-Entscheidungsalgorithmus

## 5.3 Fallstudie

Zur anschaulichen Darstellung der Funktionsweise des vorgeschlagenen FLASHED-Frameworks wird in diesem Abschnitt eine Fallstudie durchgeführt. Die Konfigurationsdaten aus dieser Fallstudie finden ihre Verwendung bei den Simulationen in Kapitel 7. In der nachfolgenden Fallstudie wird die FLASHED-Datenbank mit Bei-

spielkonfigurationsdaten gefüllt. Am Ende der Fallstudie wird an einem Beispiel mit drei Alternativen die Bestimmung der besten Alternative gezeigt.

### 5.3.1 Konfiguration der Komponenten in den Datenbanktabellen

In Tabelle 5.6 sind die Komponenten zusammengetragen, die in dieser Fallstudie verwendet werden. Dabei geht es um zwei Nutzer und um zwei Perspektiven. Außerdem werden vier Ziele (*Goals*) und sieben Kriterien betrachtet: *Delay* (Verzögerung), *Jitter* (Verzögerungsschwankung), *PacketLoss* (Paketverlustrate), *AvailBitrate* (verfügbare Bitrate), *Cost* (Kosten), *PoALoad* (aktuelle PoA-Last), *PoAMaxBR* (maximale Bitrate von PoA). Zusätzlich werden zwei Anwendungen bei der Handoverentscheidung berücksichtigt. Dabei handelt es sich um eine Streaming-Anwendung (*StreamingApp*) und eine *Voice over Internet Protocol* (VoIP)-Anwendung (*VoIPApp*). In diesem Unterkapitel wird die Parametrierung von diesen Komponenten in dazugehörigen Datenbanktabellen aus dem EER-Modell aus Abbildung 5.2 dargestellt. Für diese Fallstudie werden folgende Richtlinien hinsichtlich der Priorisierung der Perspektiven und der Ziele von Netzbetreiber gesetzt: die Perspektiven von Nutzer und Netzbetreiber sollen gleiche Gewichte haben, auch die Ziele von Netzbetreiber sollen gleichmäßig priorisiert werden.

| Komponententyp     | Name             |
|--------------------|------------------|
| <i>User</i>        | Admin            |
|                    | DefaultUser      |
| <i>Perspective</i> | User             |
|                    | ServiceProvider  |
| <i>Goal</i>        | QoS              |
|                    | Cost             |
|                    | Overf. reduction |
|                    | Load balancing   |
| <i>Criterion</i>   | delay            |
|                    | jitter           |
|                    | packetLoss       |
|                    | availBitrate     |
|                    | cost             |
|                    | PoALoad          |
|                    | PoAMaxBR         |
| <i>Application</i> | StreamingApp     |
|                    | VoIPApp          |

Tabelle 5.6: Komponenten für die Fallstudie

An dieser Stelle ist es wichtig anzumerken, dass das Ziel dieser Fallstudie in der Vorstellung der Struktur und Funktionsweise des FLASHED-Frameworks und nicht in einer Vorgabe von Konfigurationsdaten besteht. Nichtsdestotrotz wird das FLASHED-Framework im Rahmen dieser Fallstudie mit realitätsnahen Beispieldaten gefüllt.



Beim Einsatz in einem realen Kommunikationsnetz sollen die Konfigurationsschritte des FLASHED-Frameworks wie das Definieren von Komponenten (Perspektiven, Ziele, Kriterien, Algorithmen, Anwendungen) und deren Parametrierung von Experten in Abhängigkeit von Gegebenheiten der jeweiligen Netzwerkinfrastruktur individuell durchgeführt werden.

Die erste Tabelle der FLASHED-Datenbank *General* enthält zwei Konfigurationsparameter. Der Parameter *maxDegOptCoeff* ist ein AORA-Parameter, der in Abschnitt 4.3 beschreiben ist. Der *maxDegOptCoeff*-Wert ist hier auf 3 gesetzt, was eine mindestens dreifache normierte, gewichtete und summierte Überschussreduzierung von beschränkten Kriterien im Vergleich zu der normierten, gewichteten und summierten Reduzierung von nicht beschränkten Kriterien für AORA definiert.

Der zweite Parameter *addBitrateCoeff* dient für die Vergrößerung der unteren Grenze der zulässigen und der gesättigten Bereiche des Kriteriums verfügbare Bitrate. Die Anwendung dieses Parameters resultiert in einer Erhöhung der gebuchten Bitrate bei der Handoverentscheidung. Diese zusätzliche Bitrate ist für das durch die Signalisierung erzeugte Datenaufkommen gedacht.

| name            | value |
|-----------------|-------|
| maxDegOptCoeff  | 3     |
| addBitrateCoeff | 1,3   |

Tabelle 5.7: Tabelle *General*

In Tabelle 5.8 *User* sind zwei Nutzer des Systems konfiguriert. Der Eintrag *Admin* ist für einen Administrator des Netzbetreibers, und der Eintrag *DefaultUser* ist für einen Endnutzer vorgesehen.

| name        | role  |
|-------------|-------|
| Admin       | admin |
| DefaultUser | user  |

Tabelle 5.8: Tabelle *User*

In Tabelle 5.9 *Perspective* sind Perspektiven von Nutzer (engl. *User*) und von Netzbetreiber (engl. *ServiceProvider*) definiert und gewichtet. Dabei wurden beide Perspektiven gemäß der Fallstudierichtlinien gleichmäßig gewichtet.

Tabelle 5.10 *Goal* beinhaltet die Ziele des Nutzers *QoS* und Kosten (engl. *Cost*) und die Ziele des Netzbetreibers Lastverteilung (engl. *LoadBalancing*) und Überschussreduzierung (engl. *OverfReduction*). Jedes Ziel gehört einem Nutzer an. Die Ziele sind untereinander gemäß der Fallstudierichtlinien gleich priorisiert.

| name            | weight |
|-----------------|--------|
| User            | 0,5    |
| ServiceProvider | 0,5    |

Tabelle 5.9: Tabelle *Perspective*

| name           | parentPerspective | weight | ownedByUser |
|----------------|-------------------|--------|-------------|
| QoS            | User              | 0,5    | DefaultUser |
| Cost           | User              | 0,5    | DefaultUser |
| LoadBalancing  | ServiceProvider   | 0,5    | Admin       |
| OverfReduction | ServiceProvider   | 0,5    | Admin       |

Tabelle 5.10: Tabelle *Goal*. Hier wurden Ziele und deren Gewichte gesetzt. Die Ziele werden den Perspektiven zugeordnet.

In Tabelle 5.11 *Criterion\_basic* werden Kriterien und deren Basisparameter konfiguriert. Diese Kriterien wurden in Abschnitt 3.3 vorgestellt.

| name         | unit    | impact  | utilityFunctionfType |
|--------------|---------|---------|----------------------|
| delay        | ms      | cost    | absMaxMin            |
| jitter       | ms      | cost    | absMaxMin            |
| packetLoss   | [0, 1]  | cost    | absMaxMin            |
| availBitrate | kbit/s  | benefit | absMaxMin            |
| cost         | C/MByte | cost    | absMaxMin            |
| PoALoad      | kbit/s  | cost    | absMaxMin            |
| PoAMaxBR     | kbit/s  | benefit | absMaxMin            |

Tabelle 5.11: Tabelle *Criterion\_basic*

In Tabelle 5.12 *Criterion\_specific* werden Kriterien aus Tabelle 5.11 *Criterion\_basic* mit nutzerspezifischen Konfigurationsdaten gefüllt. Jedes Kriterium wird einem Ziel (engl. *Goal*) und einem Nutzer zugewiesen. Dabei wird für die Kriterienbenennung folgende Namenskonvention benutzt: [Name des Elternkriteriums]\_[Name des Elternziels]\_[Name des Nutzers]. In dieser Tabelle geht es um keine anwendungsspezifische Kriterienkonfiguration. Für nicht anwendungsspezifische Kriterienkonfiguration gibt es keine bekannten Richtlinien für Kriterienkonfiguration. Deswegen werden Kriterien mit gleichen Gewichten konfiguriert. Die restlichen Kriterienwerte werden aufgrund folgender Überlegungen gesetzt. Da es um keine anwendungsspezifische Konfiguration, sondern um eine generische Konfiguration der Kriterien geht, sollen die Kriterienwerte so gewählt werden, dass sie möglichst allen Anwendungstypen gerecht werden. Der anspruchsvollste Anwendungstyp hinsichtlich Kriterienanforderungen ist der *Conversational*-Typ. Deswegen werden die Kriterienparameterwerte ausgehend von diesem Anwendungstyp gewählt. Somit werden die zulässigen Bereiche (engl. *fea-*

| name                | parentCrit.  | parentGoal      | weight | f. Range   | s. Range | ownedByUser  |
|---------------------|--------------|-----------------|--------|------------|----------|--------------|
| delay_QoS_defUser   | delay        | QoS             | 0,25   | 0-400      |          | Default User |
| jitter_QoS_defUser  | jitter       | QoS             | 0,25   | 0-30       |          | Default User |
| pLQoS_defUser       | packetLoss   | QoS             | 0,25   | 0-0,01     |          | Default User |
| availBR_QoS_defUser | availBitrate | QoS             | 0,25   | 0-18000000 |          | Default User |
| cost_Cost_defUser   | cost         | Cost            | 1      | 0-200      |          | Default User |
| delay_OR_Admin      | delay        | OverffReduction | 0,2    | 0-400      |          | Admin        |
| jitter_OR_Admin     | jitter       | OverffReduction | 0,2    | 0-30       |          | Admin        |
| pLOR_Admin          | packetLoss   | OverffReduction | 0,2    | 0-0,01     |          | Admin        |
| availBR_OR_Admin    | availBitrate | OverffReduction | 0,2    | 0-18000000 |          | Admin        |
| cost_OR_Admin       | cost         | OverffReduction | 0,2    | 0-200      |          | Admin        |
| PoALoad_LB_Admin    | PoALoad      | LoadBalancing   | 0,5    | 0-18000000 |          | Admin        |
| PoAMaxBR_LB_Admin   | PoAMaxBR     | LoadBalancing   | 0,5    | 0-18000000 |          | Admin        |

Tabelle 5.12: Tabelle *Criterion-specific*

sible Range) für *delay\_ORA\_defUser* und *delay\_OR\_Admin* entsprechend der ITU-Empfehlung G.114 [G11403] konfiguriert. Die Auswahl der zulässigen Bereiche für *jitter\_ORA\_defUser*, *jitter\_OR\_Admin*, *pl\_ORA\_defUser* und *pl\_OR\_Admin* wird basierend auf Empfehlungen von *Cisco Systems* in [SzHa04] getroffen.

Das Gewicht für das Kriterium *cost\_Cost\_defUser* wird auf eins gesetzt, da *cost\_Cost\_defUser* ein einziges Kriterium in seinem Elternziel *Cost* ist. Die zulässigen Bereiche für *cost\_Cost\_defUser* und *cost\_Cost\_Admin* sind grob an die aktuellen Preise für Datenvolumen in Mobilfunknetzen angelehnt.

In Tabelle 5.13 *Algorithm* werden Entscheidungsalgorithmen definiert.

| name |
|------|
| ORA  |
| AORA |
| LBA  |

Tabelle 5.13: Tabelle *Algorithm*

Tabelle 5.14 *Algorithm\_and\_goal* gilt als eine Verbindungstabelle zwischen Entscheidungsalgorithmen und Zielen. Hier wird jedem Entscheidungsalgorithmus ein oder mehrere Ziele zugewiesen.

| ownedByUser | algorithm     | goal            |
|-------------|---------------|-----------------|
| DefaultUser | ORA           | QoS             |
| DefaultUser | ORA           | Cost            |
| Admin       | AORA          | OverffReduction |
| Admin       | LoadBalancing | LoadBalancing   |

Tabelle 5.14: Tabelle *Algorithm\_and\_goal*

Tabelle 5.15 *Application\_type*, Tabelle 5.16 *Application*, Tabelle 5.17 *Goal\_per\_app* und Tabelle 5.18 *Criterion\_specific\_per\_app* sind für die anwendungs- und anwendungstypspezifischen Konfigurationen vorgesehen. In Tabelle 5.15 *Application\_type* werden Anwendungstypen nach [10711] definiert. Tabelle 5.16 *Application* enthält Anwendungen und deren Zuordnung entsprechenden Anwendungstypen. Die Anwendungen *StreamingApp* und *VoIPApp* werden in dieser Fallstudie berücksichtigt. Die restlichen Anwendungen in Tabelle 5.16 dienen als Beispiele. In Tabellen 5.17 *Goal\_per\_app* und 5.18 *Criterion\_specific\_per\_app* sind die Ziele und Kriterien für Anwendungstypen *Streaming* und *Conversational* und für Anwendungen *StreamingApp* und *VoIPApp* konfiguriert, dabei wird ihre Konfiguration an die QoS-Anforderungen von jeweils YouTube-Streaming und Skype-Telefonie angelehnt.

Bei der Konfiguration der Ziele in Tabelle 5.17 geht es den einen Konfigurationsparameter Gewicht. Für die Priorisierung der Ziele gibt es keine Empfehlungen in den

| name           |
|----------------|
| Background     |
| Conversational |
| Interactive    |
| Streaming      |

Tabelle 5.15: Tabelle *Application\_type*

| name         | parentApplicationType |
|--------------|-----------------------|
| StreamingApp | Streaming             |
| VoIPApp      | Conversational        |
| Browsing     | Interactive           |
| ssh          | Interactive           |
| Download     | Background            |
| Email        | Background            |

Tabelle 5.16: Tabelle *Application*

veröffentlichten Studien. Die Gewichte für die Ziele sollen nach dem Ermessen des Entscheidungsträgers und entsprechend seiner Optimierungsstrategien gesetzt werden. In diesem Fall wäre der Nutzer *DefaultUser* für die Priorisierung der Ziele *QoS* und *Cost* zuständig und der Nutzer *Admin* für die Priorisierung von *LoadBalancing* und *OverfReduction*. Die Gewichte für die Ziele werden für diese Fallstudie nach dem subjektiven Ermessen des Autors dieser Arbeit gesetzt. Wie in Abschnitt 5.2.6 beschrieben ist, haben die anwendungsspezifischen Parameterwerte ein höheres Gewicht als anwendungstypspezifische Parameterwerte. Deswegen ist die anwendungstypspezifische Konfiguration der Ziele in diesem speziellen Fall nicht nötig und dient nur zur Präsentation der Konfigurationsmöglichkeiten der FLASHED-Datenbank.

In Tabelle 5.18 *Criterion\_specific\_per\_app* werden die Kriterienparameter Gewicht, zulässiger Bereich und gesättigter Bereich (engl. *satRange*) für die Anwendungstypen *Streaming* und *Conversational* für alle Kriterien bis auf *cost\_Cost\_defUser* gesetzt. Es wird kein Gewicht für das Kriterium *cost\_Cost\_defUser* definiert, da dieses Kriterium das einzige Kriterium für das Ziel *Cost* ist und demzufolge immer das Gewicht in Höhe von 1 hat<sup>1</sup>.

Die Recherche nach Priorisierung von QoS-Kriterien für Anwendungen YouTube-Streaming und Skype-Telefonie hat keine Ergebnisse geliefert. Dagegen gibt es grobe Richtlinien in 3GPP-Standard [10711] und einen Vorschlag aus dem Forschungsartikel [SNWo06] hinsichtlich Priorisierung der QoS-Kriterien für verschiedene Anwendungstypen. Auf Basis dieser zwei Quellen werden die Gewichte an die QoS-Kriterien für die Anwendungstypen *Streaming* und *Conversational* vergeben.

<sup>1</sup>Die Gewichte der Kriterien gelten innerhalb des gemeinsamen Ziels.

| parentGoal     | parentApplicationType | parentApplication | weight | ownedByUser |
|----------------|-----------------------|-------------------|--------|-------------|
| QoS            | Conversational        |                   | 0,6    | DefaultUser |
| Cost           | Conversational        |                   | 0,4    | DefaultUser |
| LoadBalancing  | Conversational        |                   | 0,5    | Admin       |
| OverfReduction | Conversational        |                   | 0,5    | Admin       |
| QoS            | Streaming             |                   | 0,6    | DefaultUser |
| Cost           | Streaming             |                   | 0,4    | DefaultUser |
| LoadBalancing  | Streaming             |                   | 0,5    | Admin       |
| OverfReduction | Streaming             |                   | 0,5    | Admin       |
| QoS            |                       | StreamingApp      | 0,6    | DefaultUser |
| Cost           |                       | StreamingApp      | 0,4    | DefaultUser |
| LoadBalancing  |                       | StreamingApp      | 0,5    | Admin       |
| OverfReduction |                       | StreamingApp      | 0,5    | Admin       |
| QoS            |                       | VoIPApp           | 0,6    | DefaultUser |
| Cost           |                       | VoIPApp           | 0,4    | DefaultUser |
| LoadBalancing  |                       | VoIPApp           | 0,5    | Admin       |
| OverfReduction |                       | VoIPApp           | 0,5    | Admin       |

Tabelle 5.17: Tabelle *Goal\_per\_app*

Die zulässigen Bereiche in Tabelle 5.18 *Criterion\_specific\_per\_app* für *StreamingApp* für die Kriterien *delay\_QoS\_defUser*, *jitter\_QoS\_defUser*, *pl\_QoS\_defUser*, *delay\_OR\_Admin*, *jitter\_OR\_Admin* und *pl\_OR\_Admin* werden entsprechend Empfehlungen von *Cisco Systems* [SzHa04] gesetzt. Die zulässigen und gesättigten Bereiche für die Kriterien *availBR\_QoS\_defUser* und *availBR\_OR\_Admin* werden anhand der minimal erforderlichen Bitrate von 300 kbit/s (für 240 Pixel, Auflösung: 426 x 240) und anhand der Bitrate von 2000 kbit/s (für 480 Pixel, Auflösung: 854 x 480) aus [yout17] definiert. Die Bitrate von 2000 kbit/s wird als maximal erforderliche Bitrate angenommen.

In Tabelle 5.19 werden die Anforderungen an Verzögerung, Jitter und Paketverluste für *Skype for Business client* nach [Skyp17] und die erforderliche Bitrate für SkypeVoice-Telefonie nach [Skyp16] zusammengetragen. Basierend auf diesen Daten werden die zulässigen Kriterienwertebereiche für die Anwendung *VoIPApp* konfiguriert. Auch die untere Grenze vom gesättigten Bereich in Höhe von 100 kbit/s für die Kriterien *availBR\_QoS\_defUser* und *availBR\_OR\_Admin* wird basierend auf der empfohlenen Bitrate aus dem [Skyp16] definiert.

Die Kriterien *cost\_Cost\_defUser* und *cost\_Cost\_Admin* sind nicht anwendungsabhängig. Deswegen werden diese Kriterien nicht in der Tabelle *Criterion\_specific\_per\_app*, sondern in der Tabelle *Criteria\_specific* parametrisiert.

| parentCriteria      | parentAppType  | parentApp    | weight | feasRange | satRange   | ownedBy User |
|---------------------|----------------|--------------|--------|-----------|------------|--------------|
| delay_QoS_defUser   | Streaming      |              | 0,11   | 0-5000    |            | Default User |
| jitter_QoS_defUser  | Streaming      |              | 0,23   | 0-50      |            | Default User |
| pl_QoS_defUser      | Streaming      |              | 0,03   | 0-0,05    |            | Default User |
| availBR_QoS_defUser | Streaming      |              | 0,63   |           |            | Default User |
| cost_Cost_defUser   | Streaming      |              |        |           |            | Default User |
| delay_OR_Admin      | Streaming      |              | 0,066  | 0-5000    |            | Admin        |
| jitter_OR_Admin     | Streaming      |              | 0,138  | 0-50      |            | Admin        |
| pl_OR_Admin         | Streaming      |              | 0,018  | 0-0,05    |            | Admin        |
| availBR_OR_Admin    | Streaming      |              | 0,378  |           |            | Admin        |
| cost_OR_Admin       | Streaming      |              | 0,4    |           |            | Admin        |
| delay_QoS_defUser   | Conversational |              | 0,35   |           |            | Default User |
| jitter_QoS_defUser  | Conversational |              | 0,35   |           |            | Default User |
| pl_QoS_defUser      | Conversational |              | 0,05   |           |            | Default User |
| availBR_QoS_defUser | Conversational |              | 0,25   |           |            | Default User |
| cost_Cost_defUser   | Conversational |              |        |           |            | Default User |
| delay_OR_Admin      | Conversational |              | 0,21   |           |            | Admin        |
| jitter_OR_Admin     | Conversational |              | 0,21   |           |            | Admin        |
| pl_OR_Admin         | Conversational |              | 0,03   |           |            | Admin        |
| availBR_OR_Admin    | Conversational |              | 0,15   |           |            | Admin        |
| cost_OR_Admin       | Conversational |              | 0,4    |           |            | Admin        |
| delay_QoS_defUser   | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Default User |
| jitter_QoS_defUser  | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Default User |
| pl_QoS_defUser      | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Default User |
| availBR_QoS_defUser | StreamingApp   | StreamingApp |        | 300-18000 | 2000-18000 | Default User |
| cost_Cost_defUser   | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Default User |
| delay_QoS_defUser   | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 0-50      |            | Default User |
| jitter_QoS_defUser  | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 0-30      |            | Default User |
| pl_QoS_defUser      | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 0-0,01    |            | Default User |
| availBR_QoS_defUser | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 100-18000 | 100-18000  | Default User |
| cost_Cost_defUser   | VoIPApp        | VoIPApp      |        |           |            | Default User |
| delay_OR_Admin      | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Admin        |
| jitter_OR_Admin     | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Admin        |
| pl_OR_Admin         | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Admin        |
| availBR_OR_Admin    | StreamingApp   | StreamingApp |        | 300-18000 | 2000-18000 | Admin        |
| cost_OR_Admin       | StreamingApp   | StreamingApp |        |           |            | Admin        |
| delay_QoS_defUser   | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 0-50      |            | Admin        |
| jitter_QoS_defUser  | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 0-30      |            | Admin        |
| pl_QoS_defUser      | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 0-0,01    |            | Admin        |
| availBR_QoS_defUser | VoIPApp        | VoIPApp      |        | 100-18000 | 100-18000  | Admin        |
| cost_Cost_defUser   | VoIPApp        | VoIPApp      |        |           |            | Admin        |

Tabelle 5.18: Tabelle *Criterion\_specific\_per\_app*

| QoS-Metrik                                       | Einheit | Wert                                |
|--|---------|-------------------------------------|
| Einwegverzögerung (engl. <i>one way delay</i> )  | ms      | <50                                 |
| Paketumlaufzeit (engl. <i>round trip delay</i> ) | ms      | <100                                |
| Jitter   | ms      | <30 (in einem Zeitfenster von 15 s) |
| Paketverlustrate                                 | %       | <1 (in einem Zeitfenster von 15 s)  |
| Minimal erforderliche verf. Bitrate              | kbit/s  | 30                                  |
| Empfohlene verf. Bitrate                         | kbit/s  | 100                                 |

Tabelle 5.19: Richtwerte für QoS-Metriken für *Skype for Business Client* nach [Skyp17] und die *AvailBitrate* für Skype-Telefonie nach [Skyp16]

### 5.3.2 Durchführung einer Handoverentscheidung

In dieser Sektion wird eine Beispiel-Handoverentscheidung basierend auf der MCDM-Datenbank aus dem oberen Abschnitt vorgestellt. In Tabelle 5.20 sind Beispieleingangsdaten aufgelistet.

| Datentyp                       | Wert  |
|--------------------------------|---|
| Nutzer                         | DefaultUser   |
| MCDM-Methode                   | WSM   |
| aktive Anwendungen             | StreamingApp, VoIPApp                                   |
| Kriterien                      | delay; jitter; packetLoss; availBitrate; cost; PoAMaxBR |
| Wege und deren Kriterienwerte: |   |
| AP1                            | 0,0645; 0,0021; 0,0016; 1995; 48; 2000                  |
| AP2                            | 0,0363; 0,0032; 0,0021; 11995; 47; 12000                |
| AP3                            | 0,0725; 0,0042; 0,0012; 7995; 27; 8000                  |

Tabelle 5.20: Beispieleingangsdaten

Die Entscheidungsalgorithmen ORA, AORA und LBA bewerten die Alternativen anhand der Kriterienparameter für Anwendungen *StreamingApp* und *VoIPApp* aus Tabelle 5.21.

Tabelle 5.21 zeigt die Zusammensetzung der Kriterienparameterwerte. Die ersten zwei horizontale Sektionen dieser Tabelle (*StreamingApp* und *VoIPApp*) zeigen die anwendungsspezifischen Konfigurationen der Ziele und Kriterien, die aus den Konfigurationsparameterwerten aus den Tabellen *Goal*, *Goal\_per\_app*, *Criterion* und *Criterion\_per\_app* nach dem Algorithmus aus Abschnitt 5.2.6 zusammengetragen sind. In der dritten Sektion *Zusammengesetzt* sind nach dem Algorithmus aus dem Abschnitt 5.2.6 zusammengesetzte Konfigurationsparameterwerte für Ziele und Kriterien aufgelistet. Danach, basierend auf den Daten aus der Sektion *Zusammengesetzt*, werden die Gesamtnutzwerte jeder Alternative als gewichtete Summe von Gesamtnutzwerten der Algorithmen nach Formel (5.5) kalkuliert. In dieser Fallstudie wurde die Alternative AP3 mittels des FLASHED-Frameworks als beste Lösung bestimmt.



| Application     | Alg. | Goal      | Goal weight | Kriterien     | weight | feasRange | satRange   |
|-----------------|------|-----------|-------------|---------------|--------|-----------|------------|
| StreamingApp    | ORA  | QoS       | 0,5         | delay         | 0,066  | 0-5000    |            |
|                 |      |           |             | jitter        | 0,138  | 0-50      |            |
|                 |      |           |             | packetLoss    | 0,018  | 0-0,05    |            |
|                 |      |           |             | availBitrate  | 0,378  | 300-18000 | 2000-18000 |
|                 |      | Cost      | 0,5         | cost, C/MByte | 0,4    | 0-200     |            |
|                 | AORA | OverfRed. | 0,25        | delay         | 0,066  | 0-5000    |            |
|                 |      |           |             | jitter        | 0,138  | 0-50      |            |
|                 |      |           |             | packetLoss    | 0,018  | 0-0,05    |            |
|                 |      |           |             | availBitrate  | 0,378  | 300-18000 | 2000-18000 |
|                 |      |           |             | cost          | 0,4    | 0-200     |            |
|                 | LBA  | LoadBal.  | 0,25        |               |        |           |            |
| VoIPApp         | ORA  | QoS       | 0,5         | delay         | 0,21   | 0-50      |            |
|                 |      |           |             | jitter        | 0,21   | 0-30      |            |
|                 |      |           |             | packetLoss    | 0,03   | 0-0,01    |            |
|                 |      |           |             | availBitrate  | 0,15   | 50-18000  | 100-18000  |
|                 |      | Cost      | 0,5         | cost          | 0,4    | 0-200     |            |
|                 | AORA | OverfRed. | 0,25        | delay         | 0,21   | 0-50      |            |
|                 |      |           |             | jitter        | 0,21   | 0-30      |            |
|                 |      |           |             | packetLoss    | 0,03   | 0-0,01    |            |
|                 |      |           |             | availBitrate  | 0,15   | 50-18000  | 100-18000  |
|                 |      |           |             | cost          | 0,4    | 0-200     |            |
|                 | LBA  | LoadBal.  | 0,25        |               |        |           |            |
| Zusammengesetzt | ORA  | QoS       | 0,5         | delay         | 0,137  | 0-50      |            |
|                 |      |           |             | jitter        | 0,174  | 0-30      |            |
|                 |      |           |             | packetLoss    | 0,024  | 0-0,01    |            |
|                 |      |           |             | availBitrate  | 0,264  | 350-18000 | 2100-18000 |
|                 |      | Cost      | 0,5         | cost          | 0,4    | 0-200     |            |
|                 | AORA | OverfRed. | 0,25        | delay         |        |           |            |
|                 |      |           |             | jitter        | 0,174  | 0-30      |            |
|                 |      |           |             | packetLoss    | 0,024  | 0-0,01    |            |
|                 |      |           |             | availBitrate  | 0,264  | 350-18000 | 2100-18000 |
|                 |      |           |             | cost          | 0,4    | 0-200     |            |
|                 | LBA  | LoadBal.  | 0,25        |               |        |           |            |

Tabelle 5.21: Zusammensetzung von anwendungsspezifischen Parameterwerte der Ziele und Kriterien

## 5.4 Implementierung des FLASHED-Backends

Dieses Unterkapitel beschreibt das in Java implementierte FLASHED-Backend. Es geht dabei um einen aktiven Teil des FLASHED-Frameworks, der anhand Eingangsdaten aus OMNeT++/INET und Konfigurationsdaten aus der FLASHED-Datenbank die Handoverentscheidung durchführt. In Abbildung 5.10 ist das FLASHED-Backend als Teil des FLASHED-Frameworks abgebildet. In dieser Abbildung sind auch die Funktionsblöcke des FLASHED-Backends und Berechnungsschritte inklusive der zwischen den Blöcken übertragenen Informationen präsentiert.

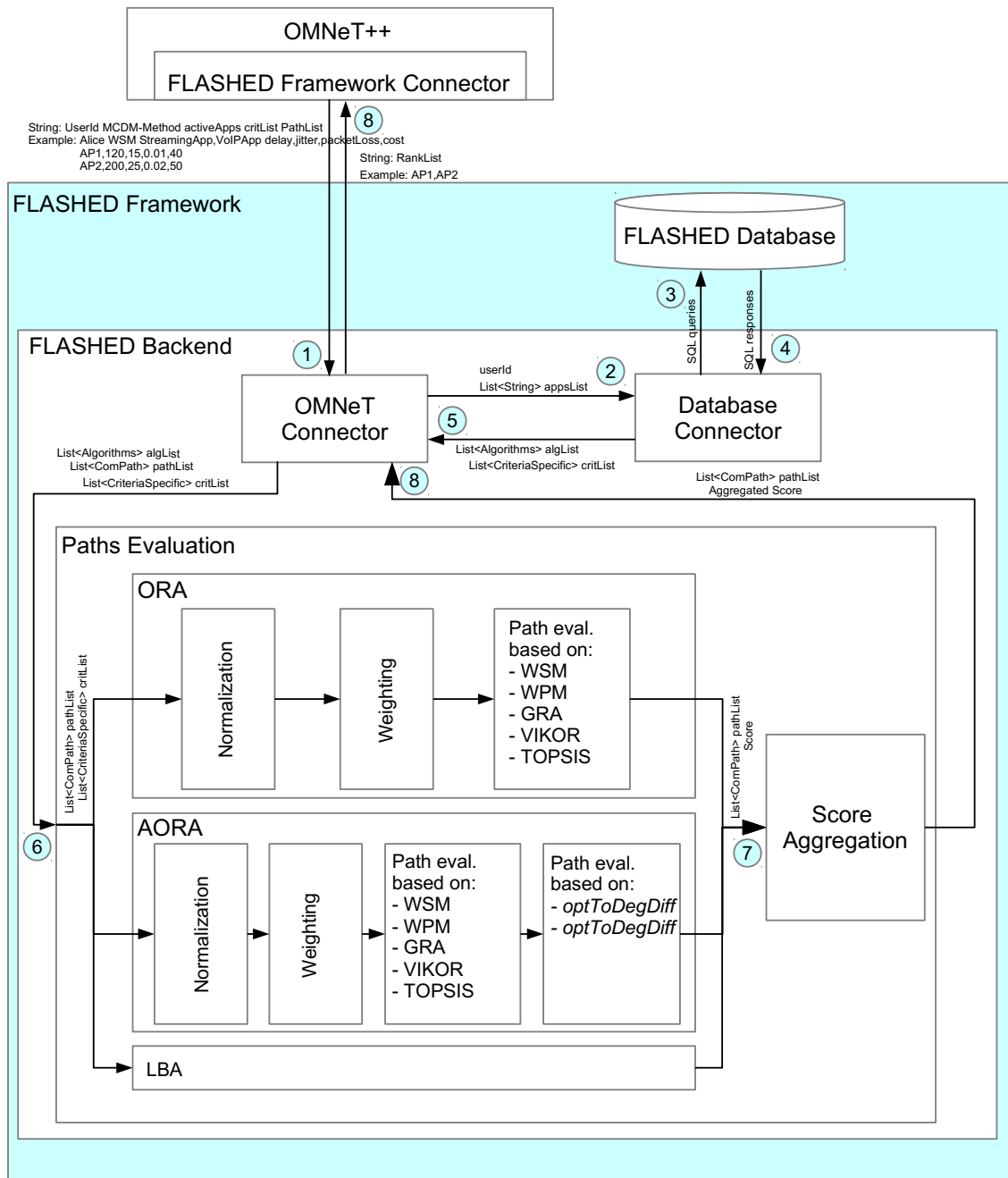


Abbildung 5.10: Darstellung des FLASHED-Frameworks. In Kreisen sind Berechnungsschritte dargestellt. Die zwischen den Subblöcken übertragenen Informationen sind neben den Pfeilen niedergeschrieben.

### 5.4.1 Funktionsblöcke

Das FLASHED-Backend ist in mehrere Funktionsblöcke unterteilt, die in diesem Abschnitt beschreiben werden.

Der *OMNeT Connector* ist der zentrale Bestandteil des FLASHED-Backends. Dieser Block interagiert mit OMNeT++/INET und mit Funktionsblöcken wie *Database Connector* und *Path Evaluation*-Block. Der *FLASHED Framework Connector* in

OMNeT++/INET (beschrieben in 6.3.6) ruft das FLASHED-Backend auf und übermittelt Eingangsdaten an *OMNeT Connector*.

Der Block *Database Connector* empfängt Daten wie Nutzernamen und die Liste der Anwendungen von *OMNeT Connector*. Danach holt der *Database Connector* für diese Daten aus der FLASHED-Datenbank die Inhalte für Tabelle 5.21. Im nächsten Schritt werden die anwendungsspezifische Parameterwerte der Ziele und Kriterien nach dem Algorithmus aus Abschnitt 5.2.6 zusammengesetzt und in Java-Objekte der entsprechenden Entscheidungsalgorithmen (siehe Sektion „Zusammengesetzt“ der Tabelle 5.21) gespeichert. Darauf folgend wird die Java-Liste der Entscheidungsalgorithmen-Objekte an *OMNeT Connector* gereicht.

Der Subblock *Path Evaluation* beinhaltet weitere vier Subblöcke. In den ersten drei Subblöcken sind die Entscheidungsalgorithmen ORA, AORA und LBA implementiert, die jeweils in Abschnitten 4.2, 4.3, 5.2.4 beschrieben sind. Die Subblöcke ORA und AORA bestehen aus den funktionalen Komponenten, in denen die MCDM-Entscheidungsphasen wie Normierung, Priorisierung und Alternativenbewertung implementiert sind. Dabei können verschiedene MCDM-Methoden bei der Alternativenbewertung benutzt werden. Der Subblock AORA enthält eine zusätzliche Komponente, die die Alternativenbewertung anhand *optToDegDiff* und *optToDegDiff* aus dem Abschnitt 4.3 durchführt.

Die Subblöcke ORA, AORA und LBA erhalten die Liste aller Alternativen und ihrer Kriterien von *OMNeT Connector*. Sie berechnen daraus für jede Alternative ihren Gesamtnutzwert und reichen ihn an den *Score Aggregation*-Subblock. Der *Score Aggregation*-Subblock setzt für jede Alternative ihre Gesamtnutzwerte nach Formel (5.5) aus Abschnitt 5.2.5 zu einem aggregierten Gesamtnutzwert zusammen. Der Subblock *Score Aggregation* leitet danach die Alternativen inklusive ihrer aggregierten Gesamtnutzwerte an den *OMNeT Connector* weiter. Im letzten Schritt erstellt der *OMNeT Connector* eine Rangliste anhand der aggregierten Gesamtnutzwerte der Alternativen und sendet diese Liste an OMNeT++/INET.

## 5.5 Kapitelzusammenfassung

Im diesem Kapitel wurde ein flexibles Framework für multikriterielle anwendungssensitive Handoverentscheidung namens FLASHED-Framework präsentiert. Die Grundidee des FLASHED-Frameworks ist der Aufbau einer Lösung für eine umfangreiche und flexible Handoverentscheidung. Dabei wird unter „umfangreich“ eine Möglichkeit zur Konfiguration möglichst vieler für Handover relevanten Informationen in einer strukturierten Form gemeint. Unter „flexibel“ wird eine Möglichkeit zur schnellen und einfachen Änderung der Konfiguration der Informationssätze verstanden.

Die Grundlage für das FLASHED-Framework bildet der MCDM-Prozess. Aus dem MCDM-Prozess wurden sogenannte logische Komponententypen wie Ziel (engl. *Goal*), Kriterium (engl. *Criterion*) und Algorithmus (engl. *Algorithm*) abgeleitet. Außerdem wurden weitere Komponententypen wie Nutzer (engl. *User*), Perspektive (engl. *Perspective*) und Anwendung (engl. *Application*) definiert, auf denen Funktionalitäten wie Perspektivensensitivität und Anwendungssensitivität aufgebaut wurden. Ein Komponententyp kann als ein Container für einen Satz logisch zusammenhängender Informationen verstanden werden. Die Komponententypen wurden in Form einer relationalen Datenbank als Datenbanktabellen implementiert.

Eine besondere Aufmerksamkeit verdient an dieser Stelle die Perspektivensensitivität. Mit der Perspektivensensitivität wird im Kontext vorliegender Arbeit die Berücksichtigung verschiedener Perspektiven bei der Handoverentscheidung verstanden. In dieser Arbeit wurden die Perspektiven des Nutzers und Netzbetreibers berücksichtigt. Der Nutzer und der Netzbetreiber können bei der Handoverentscheidung verschiedene Ziele verfolgen. So ist es naheliegend, dass es im Interesse des Nutzers eine Verbesserung der Werte bestimmter Entscheidungskriterien wie zum Beispiel QoS-Kriterien oder monetäre Kosten ist. Dagegen können Optimierungsziele wie gleichmäßige Lastverteilung oder Überschussreduzierung für den Netzbetreiber von großer Bedeutung sein. Für diese zwei Perspektiven wurden in dieser Dissertation folgende Handover-Entscheidungsalgorithmen vorgeschlagen: für die Nutzerperspektive – ORA (beschrieben in Abschnitt 4.2), für die Netzbetreiberperspektive – AORA (beschrieben in Abschnitt 4.3) und LBA (beschrieben in Abschnitt 5.2.4). Diese drei Algorithmen wurden in das FLASHED-Framework integriert und können unterschiedlich priorisiert werden.

Als Nächstes wurde ein lastverteilungsorientierter Handover-Entscheidungsalgorithmus namens LBA vorgestellt. Der Algorithmus wurde für die Vervollständigung des Algorithmenportfolios des FLASHED-Frameworks entwickelt und hat keinen Anspruch auf eine besondere Originalität. Die Handoverentscheidung im LBA basiert auf der Auswertung eines Lastverteilungskoeffizientes. Die Berechnung des Lastvertei-

lungskoeffizienten seinerseits erfolgt durch die Auswertung der relativen verfügbaren Bitraten der APs.

Wie oben schon erwähnt wurde, ist die Anwendungssensitivität eine der zentralen Funktionalitäten des FLASHED-Frameworks. Dabei geht es um die Konfiguration der Ziele und Kriterien in Abhängigkeit von aktiven Anwendungen und deren Typen. Dafür wurden entsprechende Komponenten für Anwendungen, Anwendungstypen, Ziele und Kriterien definiert und in der Datenbank implementiert. Außerdem wurde ein Algorithmus für die anwendungsabhängige Konfiguration der Ziele und der Kriterien ausgearbeitet. Der Algorithmus fügt im Falle von mehreren aktiven Anwendungen die anwendungsspezifische Konfigurationsparameter der Ziele und der Kriterien nach bestimmten Regeln zusammen.

Die Funktionsweise des FLASHED-Frameworks wurde anhand einer Fallstudie gezeigt. Dafür wurde die FLASHED-Datenbank mit Beispieldaten gefüllt, für die dann eine Handoverentscheidung durchgeführt wurde.

Am Ende des Kapitels wurde das FLASHED-Backend beschrieben. Das FLASHED-Backend ist der aktive Teil des FLASHED-Frameworks, der für die Durchführung der Handoverentscheidung zuständig ist. Das FLASHED-Backend ist in Funktionsblöcke aufgeteilt, in denen die Schnittstellen für die Kommunikation mit OMNeT++/INET und der Datenbank und auch die Algorithmen wie ORA, AORA und LBA implementiert sind. Das FLASHED-Framework eignet sich prinzipiell für den Einsatz in realen Kommunikationsumgebungen als eine Instanz für die Konfiguration und Durchführung von Handoverentscheidungen für mobile Endgeräte.



## 6 Implementierungen in OMNeT++

In dieser Dissertation werden die vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen aus Kapitel 4 und das Framework aus Kapitel 5 in einer Simulationsumgebung evaluiert. Dafür wurde eine Simulationsumgebung ausgewählt und mit für die Simulationsszenarien fehlenden Funktionalitäten erweitert.

### 6.1 Auswahl einer Simulationsumgebung

Die Simulationsumgebung für die geplanten Simulationsszenarien muss folgenden Anforderungen genügen:

- Verfügbarkeit der Modellierung einer modernen drahtlosen Kommunikationstechnologie wie zum Beispiel IEEE 802.11,
- Möglichkeit der Konfiguration von mehreren Basisstationen und mehreren mobilen Clients,
- Möglichkeit der Generierung von Anwendungsverkehr,
- Möglichkeit der Implementierung fehlender Funktionalitäten und die Anbindung an externe Bibliotheken.

Die Simulationsumgebungen wie *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++) [OMNe15] und *Network Simulator 3* (ns3) [ns3217] wurden als mögliche Plattformen für die Evaluierung betrachtet. Die Simulationsumgebung ns2 wurde nicht in Betracht gezogen, da ihre Entwicklung im Jahr 2011 eingestellt wurde [ns2217]. OMNeT++ und ns3 haben einige Gemeinsamkeiten. Beide Simulationsumgebungen sind in C++ implementierte *Open-Source*-Projekte, die für private und akademische Zwecke kostenfrei verfügbar sind. Beide sind für die Modellierung von diskreten ereignisbasierten Systemen konzipiert und werden in erster Linie für die Simulationen von Netzwerktechnologien verwendet. Sowohl bei ns3 als auch bei OMNeT++ ist es möglich *pcap-traces* zu generieren, mit deren Hilfe dann der Datenverkehr mit Wireshark [Wire17] analysiert werden kann.

ns3 gilt als Nachfolger von ns2, wobei ns3 vollständig neu programmiert wurde und mit ns2 nicht abwärtskompatibel ist. Die Entwicklung von ns3 begann im Jahr 2006. Der Kern von ns3 ist in C++ implementiert, wobei die Simulationskonfigurationen sowohl in C++ als auch in Python geschrieben werden können. Trotz seines jungen Alters verfügt der ns3 über eine breite Palette an Modellen, die in [ns3M17] zu finden sind.

Die Simulationsumgebungen OMNeT++ und ns3 sind in ihren Funktionalitäten vergleichbar und genügen den zu Beginn erläuterten Anforderungen. Im Gegensatz zu ns3 verfügt OMNeT++ auch über ein umfangreiches *Graphical User Interface* (GUI), welches insbesondere für die Konfiguration der Simulationen und die Auswertung von Statistiken nützlich ist. Deswegen wurde sich im Rahmen vorliegender Arbeit für OMNeT++ entschieden. Im Folgenden wird OMNeT++ vorgestellt.

OMNeT++ ist keine direkte Simulationsumgebung, sondern eine universelle Plattform, die die Modellierung von verschiedenen Systemen ermöglicht. Die Anwendungsmöglichkeiten von OMNeT++ sind in [OMNe15] wie folgt beschrieben: „*in general, modeling and simulation of any system where the discrete event approach is suitable, and can be conveniently mapped into entities communicating by exchanging messages.*“ OMNeT++ findet eine breite Akzeptanz im Bereich der Simulation von Kommunikationsnetzen einschließlich Netzwerkprotokollen.

Die Grundbausteine von OMNeT++ sind Module, Gates und Nachrichten. Es gibt zwei Typen von Modulen, nämlich sogenannte *Simple*- und *Compound*-Module. Ein *Compound*-Modul besteht aus mehreren *Simple*-Modulen. Jedes Modul kann einen oder mehrere *Gates* haben. *Simple-Module* können als Container für die Implementierung von verschiedenen Prozessen angesehen werden, die mit anderen Modulen über *Gates* oder Signale kommunizieren. Die Module können beliebig verschachtelt sein. Eine im OMNeT++ aufgebaute Simulation ist eine Sammlung von verschiedenen Modulen, die gemäß der in ihnen implementierten Routinen untereinander Nachrichten austauschen.

Der Aufbau einer Simulation geschieht über die *Network Description Language* (NED), in der Module je nach Simulationsanforderung verknüpft werden. Die Konfigurationsparameter der Module werden über die *ini*-Datei mit Werten gefüllt. OMNeT++ verfügt über eine *Eclipse*-basierte GUI. Die parallele Durchführung mehrerer Simulationen ist möglich. Die Simulationen können sowohl im GUI- als auch im *Command Line Interface* (CLI)-Modus ausgeführt werden. Der CLI-Modus bietet Möglichkeiten für die Automatisierung von Simulationen, was besonders beim Abarbeiten mehrerer Durchläufe sinnvoll ist.

Es gibt diverse Frameworks für OMNeT++, die für verschiedene Bereiche entwickelt worden sind. Eines der bekanntesten Frameworks ist das INET-Framework



[INET17b], welches eine breite Palette von Modulen für Protokolle aus verschiedenen ISO/OSI-Schichten und Module für aktuelle drahtgebundene und drahtlose Kommunikationstechnologien wie zum Beispiel Ethernet und WLAN enthält. In dieser Arbeit wurden die zum Zeitpunkt der Implementierungen aktuellen Versionen von OMNeT++ und INET verwendet: OMNeT++ 4.6 und INET 3.0.

## 6.2 Aufbau von WLAN-Infrastruktur

Der Aufbau des Simulationsnetzes ist auf Abbildung 6.1 dargestellt. Die Simulation besteht aus einer WLAN-Infrastruktur, die sich aus sechs APs auf Basis des INET-Moduls *AccessPoint* zusammensetzt. Alle APs sind an einem Switch (INET-Modul *EtherSwitch*) angeschlossen und befinden sich im gleichen LAN. Der Switch ist mit dem Router (INET-Modul *Router*) verbunden, über den die Anbindung an zwei Anwendungsserver (INET-Modul *StandardHost*) realisiert ist. Außerdem sind sieben mobile WLAN-fähige Clients (*Stations* (STA)) auf Basis des INET-Moduls *WirelessHost* konfiguriert. STAs und APs sind im INET nach dem Standard IEEE 802.11g aufgebaut. Die IP-Adressen werden aus dem Netz 11.11.0.0/16 von OMNeT++ automatisch an alle STAs, an den Router und an den Anwendungsserver vergeben.

Diese Arbeit beschäftigt sich primär mit der Handoverentscheidungsphase. Um die Umsetzung der Handoverausführungsphase einfach zu gestalten, wurden alle APs im gleichen LAN konfiguriert. Außerdem versorgen die APs alle STAs mit IP-Adressen aus dem gleichen IP-Pool. Das führt dazu, dass die Handoverausführungsphase auf der zweiten Schicht des ISO/OSI-Modells stattfindet. Somit besteht keine Notwendigkeit, die IP-Adressen von STAs nach jeder Neuassoziiierung zu ändern. Jede STA bekommt bei ihrem ersten assoziierten AP eine IP-Adresse und behält diese Adresse über die gesamte Laufzeit der Simulation.

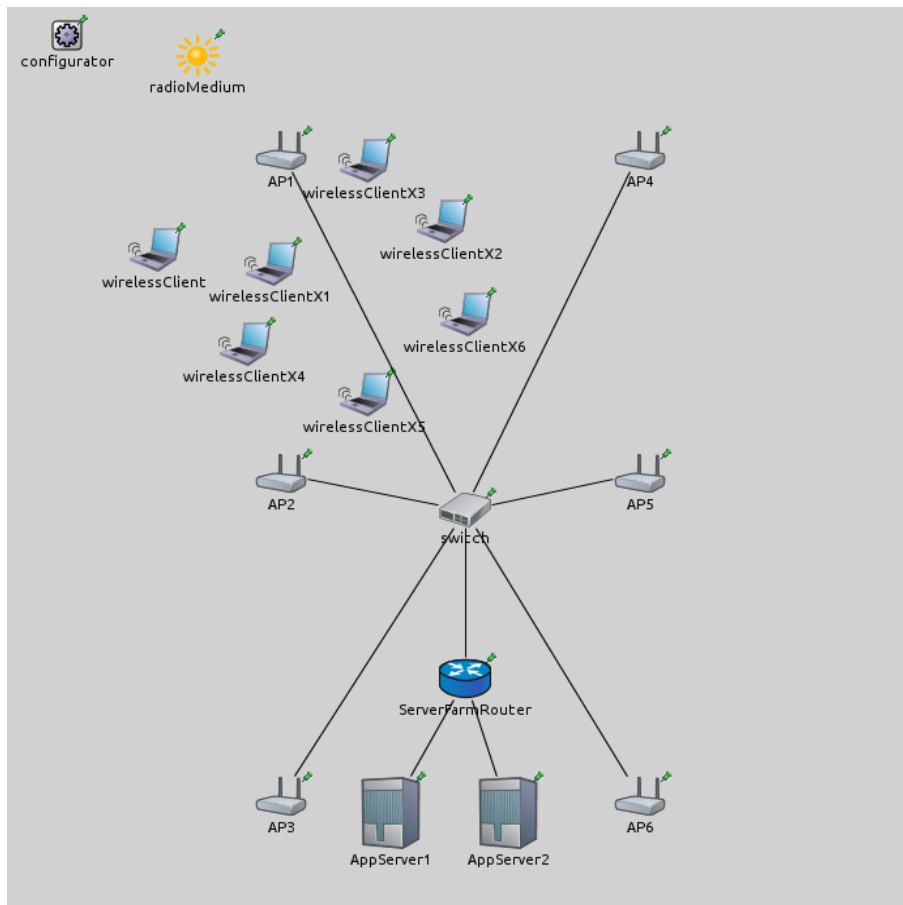


Abbildung 6.1: Aufbau des Simulationsnetzes

## 6.3 Neu implementierte Funktionalitäten in OMNeT++

Für die geplanten Simulationen sind nicht alle Funktionalitäten in der aktuellen *OMNeT++/INET* Version vorhanden. Deswegen wurde das INET-Framework im Rahmen dieser Dissertation weiterentwickelt. Die Implementierungen der fehlenden Funktionalitäten werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Die entstandene Version des INET-Frameworks wurde in [INET17a] veröffentlicht.

### 6.3.1 Passiver regelmäßiger Scan

Die Ermittlung von verfügbaren APs und deren Charakteristika in regelmäßigen Zeitabständen ist für die Simulation des nahtlosen Handovers notwendig. Dafür ist in [IEEE12] der Scanvorgang vorgesehen. Es sind zwei Typen von Scan definiert – aktiver und passiver Scan. Beim aktiven Scan sendet die STA auf jedem vorgegebenen Kanal eine *Probe-Request*-Nachricht und wartet auf jedem Kanal eine gewisse Zeitspanne auf die *Probe-Response*-Nachrichten der APs. Im Gegensatz dazu werden

beim passiven Scan keine *Probes* geschickt, sondern es wird auf den zu scannenden Kanälen nacheinander auf die AP-Beacons gewartet.

Für die Rahmenbedingungen der geplanten Simulationen ist der passive Scan eine ausreichende Lösung. Bei einer Implementierung für den produktiven Einsatz könnte der aktive Scan eine bessere Lösung sein, da man damit je nach Beaconzeitintervall die Zeit des Abhörens je Kanal reduzieren würde. Der Nachteil des aktiven Scans ist allerdings der zusätzliche Verkehr verursacht durch die *Probe*-Nachrichten.

Somit wurde sich in dieser Arbeit für den passiven Scan entschieden. Dafür wurde das Zeitintervall für das Aussenden der Beacons in allen APs mit 50 ms konfiguriert. Beim verwendeten *INET-3.0* besteht keine Möglichkeit, in der STA den Scan während einer bestehenden Assoziation mit einem AP zu starten. Diese Funktionalität ist aber für einen proaktiven Handover zwingend notwendig. Deswegen wurde INET im Rahmen dieser Dissertation entsprechend erweitert.

Abgesehen von einigen kleinen Änderungen bei den in INET vorhandenen Funktionen der Module *Ieee80211AgentSTA* und *Ieee80211MgmtSTA*, besteht diese INET-Weiterentwicklung im Wesentlichen aus einem neuen Zeitintervallparameter *regularPassiveScanTimeout* für den regelmäßigen passiven Scan und zwei neuen Funktionen *sendRegularScanRequest()* und *sendChangeChannelRequest()* für das Modul *Ieee80211AgentSTA*. Diese Funktionen sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

Der neue Zeitintervallparameter *regularPassiveScanTimeout* wurde im Modul *Ieee80211AgentSTA* definiert. Dieser Parameter beschreibt die Zeitspanne zwischen zwei passiven Scans. Die in INET vorhandenen Parameter *channelsToScan* und *maxChannelTime* wurden jeweils für die Angabe der zu scannenden Kanäle und für die Dauer des Abhörens eines Kanals verwendet.

In der Funktion *sendRegularScanRequest()* wird *scan\_Request\_Primitive* parametrisiert und an das Modul *Ieee80211AgentSTA* geschickt, wo die im INET vorhandene Routine für den passiven Scan in der Funktion *processScanCommand()* gestartet wird. Dabei werden alle vorgegebene Kanäle nacheinander nach AP-Beacons abgehört. Die AP-Informationen werden in einer Liste in der Datenstruktur *Ieee80211Prim\_Scan\_Confirm()* gesammelt. Nach dem Ende des Scans wird diese Datenstruktur über die Funktion *sendScanConfirm()* zurück an das Modul *Ieee80211AgentSTA* geschickt. Im Modul *Ieee80211AgentSTA* wird die Liste der APs und deren Informationen für die Handoverentscheidungsphase verwendet. Nach der Entscheidungsphase wird die zweite neu implementierte Funktion *sendChangeChannelRequest()* aufgerufen. Über diese Funktion wird die Datenstruktur *Ieee80211Prim\_ChangeChannelRequest* zum Umschalten auf den erforderlichen Kanal an das Modul *Ieee80211MgmtSTA* geschickt.

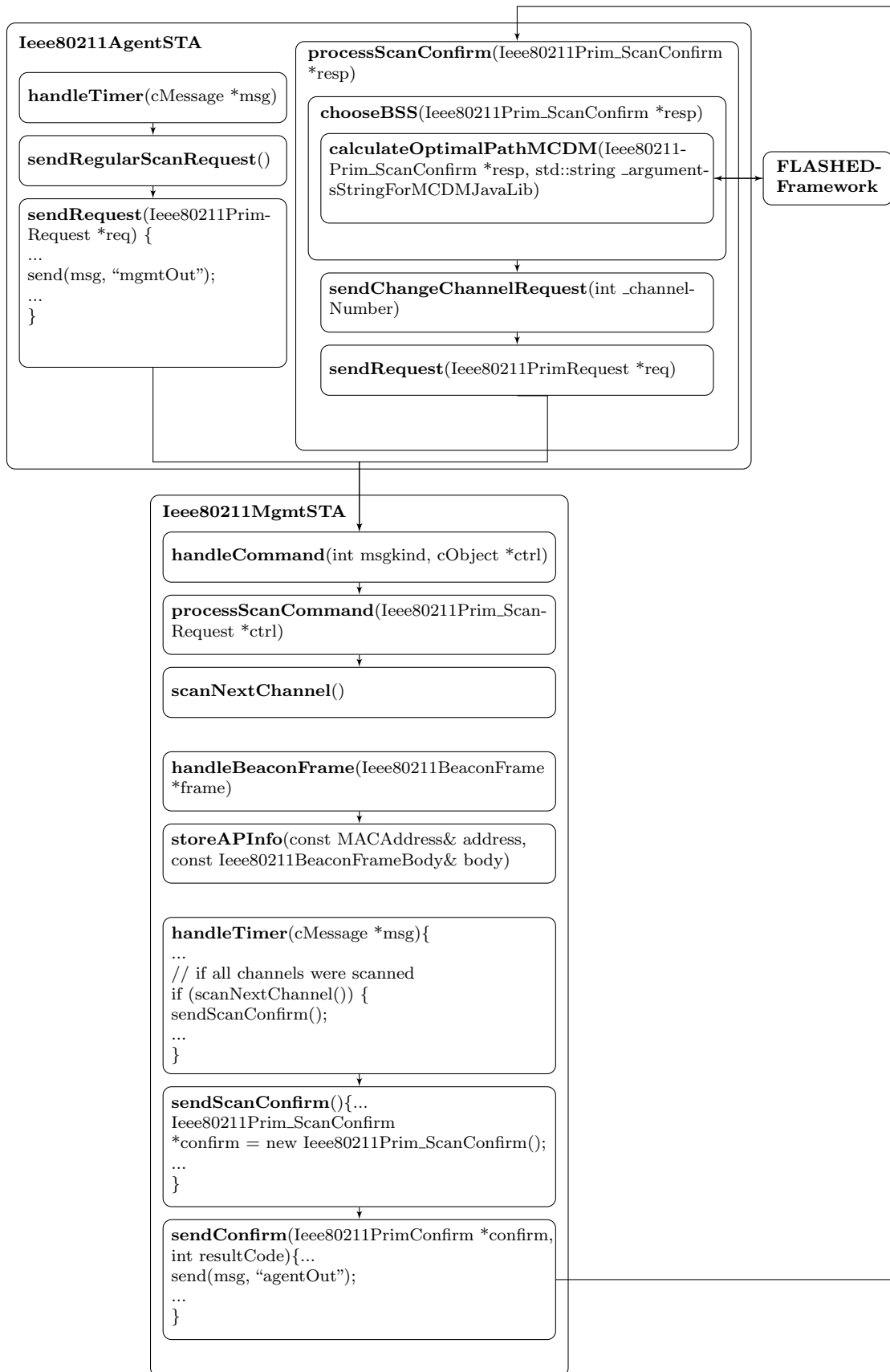


Abbildung 6.2: Implementierungen in OMNeT++/INET

Somit ist es möglich, auf der STA auch während einer bestehenden Assoziierung nach alternativen APs zu suchen und auf einen gemäß dem Entscheidungsalgorithmus besseren AP umzuschalten.

### 6.3.2 Sammeln von Kriterienwerten

In dieser Arbeit werden folgende Kriterien für die Handoverentscheidung verwendet: *Delay*, *Jitter*, *PacketLoss*, *AvailBitrate*, *Cost*, *PoALoad*, *PoAMaxBR*. Die Werte dieser Kriterien werden in der Handoverentscheidungsfunktion *chooseBSS()* im Modul *Ieee80211AgentSTA* benötigt. Allerdings sind sie in INET-3.0 an dieser Stelle nicht verfügbar. Deswegen wurde INET entsprechend erweitert.

Das Sammeln beziehungsweise Berechnen von Kriterienwerten und deren Übertragung zum Modul *Ieee80211AgentSTA* ist in Abbildung 6.3 dargestellt. In dem Modul *Ieee80211Mac* wurden Routinen für die Berechnung von *Delay* und *Jitter* in den Funktionen *getAvrBeaconDelay()* und *getAvrBeaconJitter()* implementiert. Beide Werte werden, wie deren Bezeichnungen andeuten, aus den Übertragungszeiten von Beaconframe berechnet. Zuerst wird ein Zwischenwert für das *Delay* mit Hilfe von Zeitstempeln für die Erstellung und das Ankommen von Beacons in INET wie folgt ermittelt:

$$beaconDelay = frame.getArrivalTime() - frame.getCreationTime(). \quad (6.1)$$

Der Zwischenwert für *Jitter* wird als Differenz zwischen den *Delay*-Werten von zwei aufeinander folgenden Beacons berechnet. Beide Werte werden in C++-Listen gespeichert. Die finalen Werte von *Delay* und *Jitter* werden mit Hilfe dieser Listen als Mittelwerte aus den letzten zehn Zwischenwerten kalkuliert. Die berechneten finalen Werte werden in den Beaconframe in die *SupportedRates*-Felder geschrieben.

Die Werte für die Kriterien *Cost*, *PoALoad*, *PoAMaxBR* werden im Modul *Ieee80211MgmtAP* ermittelt. *Cost* und *PoAMaxBR* werden direkt aus der *.ini*-Konfigurationsdatei ausgelesen. *PoALoad* dagegen wird in einer neu implementierten Funktion *getConfiguredThroughputOfAccociatedSTA()* kalkuliert. Hier werden im ersten Schritt alle assoziierten STAs ermittelt und im zweiten Schritt die konfigurierten Bitraten der aktiven Anwendungen auf dem assoziierten STAs aufaddiert.

Die Kriterienwerte werden im STA-Modul *Ieee80211MgmtSTA* empfangen und in die C++-Map *apList* gespeichert. In der Funktion *recieveSignal()* werden die *RSS* und die *PaketErrorRate* aus der Datenstruktur *ReceptionIndication* aus dem *Control-Info*-Objekt ausgelesen und in das dazugehörige Objekt *APInfo* aus der Map *apList* gespeichert. In der Funktion *handleBeaconFrame()* werden die Beacons empfangen.



Abbildung 6.3: Sammeln bzw. Ermitteln von Kriterienwerten in verschiedenen INET-Modulen und deren Übertragung zum Modul *Ieee80211AgentSTA*

Aus den Beacons werden die Kriterienwerte für *Delay*, *Jitter*, *Cost*, *PoALoad* und *PoAMaxBR* ausgelesen und in die Funktion *storeApInfo()* weitergegeben, wo sie in das Objekt *APInfo* des dazugehörigen APs aus der Map *apList* geschrieben werden. Auf diese Weise wird die Map *apList* mit den Kriterienwerten von allen verfügbaren APs gefüllt.

Nach dem Ende des Scanvorgang werden die Inhalte der Map *apList* über die Funktionen *sendScanConfirm()* und *sendConfirm()* mit Hilfe der Datenstrukturen *Ieee80211Prim\_ScanConfirm* und *Ieee80211Prim\_BSSDescription* an das Modul *Ieee80211AgentSTA* weitergegeben.

Im Modul *Ieee80211AgentSTA* wird die Datenstruktur *Ieee802Prim\_ScanCofirm* in der Funktion *processScanConfirm()* empfangen und an die Funktion *chooseBSS()* weitergegeben. In der Funktion *chooseBSS()* wird durch die APs-Liste aus der Datenstruktur *Ieee80211Prim\_ScanConfirm* iteriert und auf die Kriterienwerte von jedem AP zugegriffen, die im nächsten Schritt für die Entscheidungsphase verwendet werden.

### 6.3.3 Lastverteilungskoeffizient

Der Lastverteilungskoeffizient ist ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung des Netzzustandes hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Auslastung des Netzes. Meistens geht es dabei um die Verteilung des Datenverkehrs zwischen verschiedenen Netzwerkknoten. Der Lastverteilungskoeffizient ist in erster Linie für den Netzbetreiber relevant. In INET ist keine Berechnung des Lastverteilungskoeffizienten implementiert. Dieser Koeffizient ist für die Bewertung der Handoverentscheidungsergebnisse aus Perspektive des Netzbetreibers erforderlich. Deswegen wurde INET um die Berechnung dieses Koeffizienten erweitert.

Im Falle dieser Arbeit soll der Lastverteilungskoeffizient die Gleichmäßigkeit der Verteilung des Datenverkehrs unter den APs bewerten. Da in den Simulationen die APs mit unterschiedlichen maximalen Bitraten konfiguriert werden, muss der Lastverteilungskoeffizient nicht auf den absoluten, sondern auf den relativen Auslastungen der APs basierend berechnet werden. In der Praxis soll der Lastverteilungskoeffizient auf einer zentralen Instanz berechnet werden, die den Zugriff auf die Informationen über die aktuelle Last jedes APs haben muss. Das könnte zum Beispiel ein WLAN-Controller sein. Da im geplanten Simulationsaufbau keine zentrale Instanz solcher Art vorgesehen ist, wird die Berechnung des Lastverteilungskoeffizienten auf einem der APs (AP1) implementiert.

Formel (6.2) aus [VeAK04] wurde als Grundlage für die Berechnung des Lastverteilungskoeffizienten genommen.

$$L_i = \frac{(\sum_{i=0}^N B_i)^2}{N \sum_{i=0}^N (B_i)^2}, \quad \text{mit } i = 1, \dots, N; \quad i \in \mathbb{N} \quad (6.2)$$

Dabei gilt Folgendes:  $i$  – Index eines AP,  $N$  – Anzahl der APs und  $B_i$  – Verkehrslast auf dem AP  $i$ .

In dieser Arbeit wird statt der absoluten Verkehrslast  $B$  eine relative Verkehrslast  $\hat{B}$  verwendet, die nach (6.3) berechnet wird. Dabei ist  $B_{\max_i}$  die maximal unterstützte Bitrate eines APs mit dem Index  $i$ .

$$\hat{B}_i = \frac{B_i}{B_{\max_i}}, \quad \text{mit } i = 1, \dots, N; \quad i \in \mathbb{N} \quad (6.3)$$

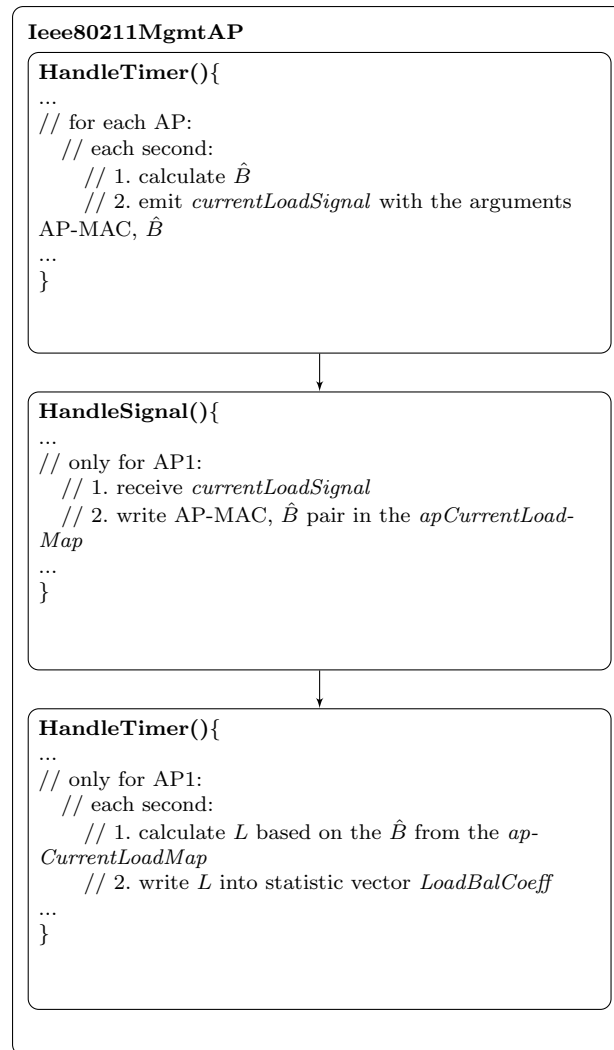


Abbildung 6.4: Implementierung der Berechnung des Lastverteilungskoeffizienten



Die Berechnung des Lastverteilungskoeffizienten wurde in drei Schritten im INET-Modul *Ieee80211MgmtAP* implementiert und ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Es wurden zwei neue Zeitintervalle, ein neues Signal (*currentLoadSignal*) und zwei INET-Funktionen (*handleTimer()* und *receiveSignal()*) implementiert. In jedem AP wird die aktuelle relative Verkehrslast berechnet. Der AP1 sammelt die Werte der aktuellen relativen Verkehrslast von jedem AP und berechnet daraus den Lastverteilungskoeffizienten für die ganze WLAN-Infrastruktur. Die Implementierung und die Funktionsweise sind im Weiteren detailliert vorgestellt.

Im ersten Schritt wird jede Sekunde in jedem AP die relative aktuelle Verkehrslast  $\hat{B}$  nach Formel (6.3) ermittelt. Danach wird das Signal *currentLoadSignal* mit der MAC-Adresse des APs und dem berechneten Wert gesendet. Dies wurde in der Funktion *handleTimer()* implementiert.

Im zweiten Schritt wurde durch eine Bedingung in der Funktion *receiveSignal()* sichergestellt, dass nur der AP mit dem Namen *AP1* das Signal *currentLoadSignal* empfängt und Werte wie die MAC-Adresse des APs und die relative Verkehrslast in die Map *apCurrentLoadMap()* speichert.

Im dritten Schritt wird im *AP1* in der Funktion *handleTimer()* jede Sekunde der relative Lastverteilungskoeffizient basierend auf den Werten aus der Map *apCurrentLoadMap* nach Gleichung (6.2) berechnet und in den Statistikvektor *loadBalCoeff* geschrieben.

### 6.3.4 Adaptivität der Bitrate für die Anwendungen

Eine Reihe moderner Anwendungen ist in der Lage, ihre Qualität und demzufolge den generierten Datenverkehr an den aktuellen Status des Netzes anzupassen. Bekannt sind adaptive Video-Streaming-Anwendungen wie *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* (DASH) [230014], *Adobe Dynamic Streaming for Flash* [Plat10], *Microsoft Smooth Streaming* [MS-S16] und Apples *HTTP Live Streaming* [HTTP17]. Auch einige Sprachcodecs wie zum Beispiel *Adaptive Multi-Rate* (AMR) [3GPP11] oder *Opus* [VaVT12], die bei VoIP-Anwendungen eingesetzt werden, wurden im Hinblick auf die Adaptivität hinsichtlich der generierten Bitrate entwickelt. Deswegen wurde in vorliegender Arbeit entschieden, Streaming-Anwendungen mit adaptiven Bitraten zu simulieren. Da die Bitratenunterschiede bei Sprachcodecs relativ zu den Datenübertragungsraten moderner mobiler Netze klein sind, sind sie demzufolge für die Simulation eher irrelevant. Alle VoIP-Anwendungen werden deshalb mit einer konstanten Bitrate simuliert.

Für die im INET verfügbaren Anwendungen sind nur statisch generierte Bitraten konfigurierbar. Für jede Anwendung erfolgt die Konfiguration der generierten Bitrate über die Parameter *messageLength* und *sendInterval* in der *.ini*-Konfigurationsdatei.

Das *WirelessHost*-Modul von INET wurde um die Funktionalität der Änderung der generierten Bitraten für die Anwendung *UDPBasicApp* erweitert. Die Implementierung erfolgte im Submodul von *WirelessHost* – im *Ieee80211AgentSTA*. Dafür wurden zwei neue Funktionen *getConfiguredUdpEchoApps()* und *reconfAppsBitratesNew()* im *Ieee80211AgentSTA* implementiert. Auch wurde der neue Parameter *possibleBitratesKbps* für die Angabe von möglichen Anwendungsbitraten im Modul *UDPBasicApp* definiert.

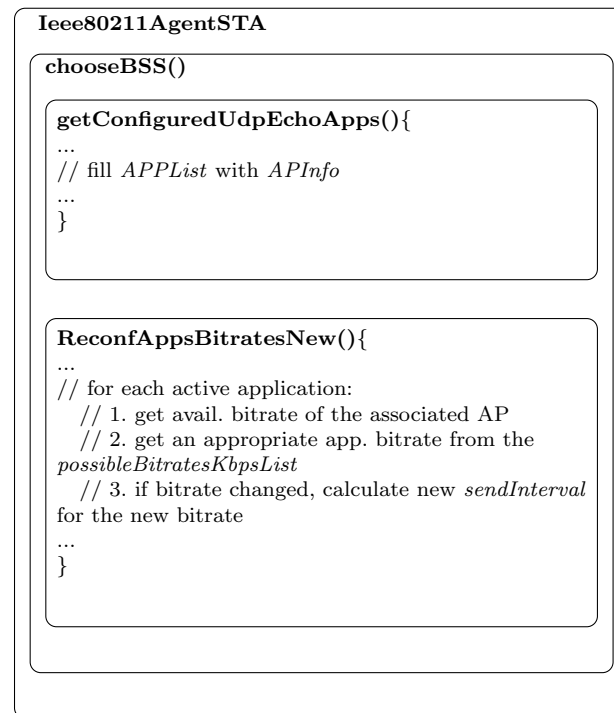


Abbildung 6.5: Routine für die Anpassung der von Anwendungen generierten Bitraten

Der Ablauf der implementierten Routine ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Am Anfang der Funktion für die Handoverentscheidung *chooseBSS()* wird die Funktion *getConfiguredUdpEchoApps()* aufgerufen, in der die auf der aktuellen STA konfigurierten Anwendungen inklusive deren Parameter ermittelt und in die Map *APPList* geschrieben werden. Nach der Handoverentscheidungsroutine in *chooseBSS()* wird die Funktion *reconfAppsBitratesNew()* aufgerufen. In dieser Funktion werden neue Bitraten für alle aktiven Anwendungen in den drei in Abbildung 6.5 dargestellten Schritten berechnet.

### 6.3.5 Zusätzlich implementierte Statistikfunktionen

Für die geplanten Simulationen wurde eine Reihe neuer Statistikfunktionen in verschiedenen Modulen im INET implementiert. Diese Statistikfunktionen sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

### 6.3.6 Anbindung an das FLASHED-Framework

Die Anbindung von OMNeT++/INET an das FLASHED-Framework wurde im Modul *Ieee80211AgentSTA* in der Funktion *calculateOptimalPathMCDM* implementiert. Dort wird über die C++-Funktion *popen* das *Java Archive* (JAR) aufgerufen, das das *FLASHED-Backend* enthält. An das JAR wird eine Reihe von Parametern als Argumente in folgender Form übergeben: *userName appList requiredBitrate MCDM\_method criteriaList alternativeValueslist*. Diese Argumente sind für folgende Werte vorgesehen:

- *userName* – Name des Nutzers,
- *requiredBitrate* – maximal mögliche generierte Bitrate von allen aktiven Anwendungen in bit/s,
- *appList* – kommasetrennte Liste von der auf der STA konfigurierten Anwendungen,
- *MCDM\_method* – MCDM-Methode,
- *criteriaList* – kommasetrennte Liste von Kriterien,
- *alternativeValuesList* – leerzeichengetrennte Liste von Kommunikationswegen inklusive folgender Informationen pro Kommunikationsweg:
  - Unixzeit,
  - MAC-Adresse des APs,
  - Kriterienwerte für alle Kriterien aus der Liste *criteriaList*.

Hier ist ein Beispiel für die Argumente: *DefaultUser StreamingApp,VoIPApp 900 WSM delay,jitter,packetLoss,availBitrate, cost,PoALoad,PoAMaxBR 1477845017,04-00-00-00-00,0.000930,0.000572,0,12000,77,500,12000 1477845017,05-00-00-00-00,0.000935,0.000525,0,1000,74,750,1000*

Aus dem Beispiel der Argumente geht Folgendes hervor. Der Name des Nutzers ist *DefaultUser*. Es sind zwei Anwendungen *StreamingApp* und *VoIPApp* aktiv, die eine maximale Bitrate von 900 kbit/s generieren. Die Handoverentscheidung soll mit

| Modul                    | Statistikfunktion             | Einheit     | Kommentar   |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|---|
| <i>Ieee80211AgentSTA</i> | <i>apID</i>                   | MAC-Adresse | aktuell assoziierter AP   |
|                          | <i>availBitrate</i>           | bit/s       | verfügbare Bitrate des assoziierten APs   |
|                          | <i>numberOfHOs</i>            |             | kumulierter Wert der Anzahl von Handover  |
|                          | <i>relOverfOfAvailBitrate</i> |             | Relativer Überschuss der verfügbaren Bitrate, der als Differenz zwischen der verfügbaren Bitrate des assoziierten APs und der erforderlichen Bitrate von STA-Anwendungen normiert auf die maximale Bitrate des APs berechnet wird. Je höher der <i>relOverfOfAvailBitrate</i> ist, desto höher ist der Überschuss. Die Werte liegen im Bereich von 0 bis 1. |
|                          | <i>currentEchoAppsBitrate</i> | bit/s       | aktuell konfigurierte Bitrate von aktiven Anwendungen   |
|                          | <i>cost</i>                   | C/MByte     | monetäre Kosten des assoziierten APs  |
| <i>Ieee80211MgmtAP</i>   | <i>availBitrate</i>           | bit/s       | verfügbare Bitrate  |
|                          | <i>loadBalCoeff</i>           |             | Lastverteilungskoeffizient der WLAN-Infrastruktur mit dem Wertebereich von 0 bis 1 (beschrieben in 6.3.3)   |
| <i>Ieee80211Mac</i>      | <i>beaconDelay</i>            | s           | basierend auf den Beacons-Laufzeiten berechnete Latenzzeit (beschrieben in 6.3.2)   |
|                          | <i>beaconJitter</i>           | s           | basierend auf den Beacons-Laufzeiten berechnete Schwankung der Latenzzeit (beschrieben in 6.3.2)  |

Tabelle 6.1: Implementierte Statistikfunktionen

Hilfe der MCDM-Methode WSM durchgeführt werden. Die Kriterien *Delay*, *Jitter*, *PacketLoss*, *AvailBitrate*, *Cost*, *PoALoad*, *PoAMaxBR* werden bei der Handoverentscheidung verwendet. Die Unixzeit der Handoverentscheidung ist *1477845017*, und es gibt zwei alternative Kommunikationswege, nämlich über die APs mit MAC-Adressen 04-00-00-00-00-00 und 05-00-00-00-00-00. Die Kriterienwerte für jeden AP sind kommasetrennt aufgelistet.

Das FLASHED-Framework bestimmt basierend auf diesen Argumenten den besten AP und gibt die MAC-Adresse des besten APs zurück. Diese MAC-Adresse wird in der Funktion *calculateOptimalPathMCDM()* ausgewertet und darauf basierend der Index des besten APs aus der Liste der verfügbaren APs ermittelt. Dieser Index wird als Ausgabewert an die Funktion *chooseBSS()* zurückgegeben und in der Handoverausführungsroutine in der Funktion *processScanConfirm()* weiterverwendet.

## 6.4 Zusammenfassung

Für die Evaluierung des FLASHED-Frameworks inklusive der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen wurde sich für die Simulationsumgebung OMNeT++ in Kombination mit der Bibliothek INET entschieden, in der eine WLAN-Infrastruktur modelliert wurde. Es wurde festgestellt, dass für die Simulation eines multikriteriellen Handovers eine Reihe von Funktionalitäten fehlt. Die Implementierung von fehlenden Funktionalitäten erfolgte im Rahmen dieser Dissertation.

Als Erstes wurde die STA in OMNeT++/INET mit einem regelmäßigen passiven Scan erweitert. Der passive Scan ermöglicht das Abhören aller konfigurierten WLAN-Radiokanälen nacheinander in regelmäßigen über die *.ini*-Datei konfigurierbaren Zeitabständen. Dabei sammelt die STA über empfangene Beacons die Charakteristiken der verfügbaren Kommunikationswege wie Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate, Kosten, verfügbare und maximale Bitrate. Diese Charakteristiken werden dann als Entscheidungskriterien in den Entscheidungsalgorithmus eingespeist. Auch die Ermittlung der Werte dieser Charakteristiken wurde im Rahmen dieser Arbeit realisiert. Eine weitere Implementierung ermöglicht die Bewertung der Lastverteilung in der WLAN-Infrastruktur mittels eines Lastverteilungskoeffizienten. Der Lastverteilungskoeffizient wird auf Basis der relativen Last jedes APs nach jedem regelmäßigen passiven Scanvorgang berechnet und in die entsprechenden Statistikdateien geschrieben. Die relative Last jedes APs wird als Verhältnis zwischen der aktuellen Last und der maximal verfügbaren Bitrate des APs berechnet. Die nächste Weiterentwicklung beruht auf der Tatsache, dass einige Anwendungen wie zum Beispiel einige Video-Streaming-Dienste die generierte Bitrate dynamisch ändern. Dabei wird die generierte Bitrate in Abhängigkeit von den vorhandenen Ressourcen des aktuellen Kommunikationsweges angepasst. Deswegen wurde das INET-Modul für die Anwendungsmodellierung *UDPBasicApp* um eine dynamische Anpassung der generierten Bitrate erweitert. Nach jedem Scanvorgang erfolgt die Überprüfung der verfügbaren Bitrate des assoziierten APs und entsprechende Anpassung der generierten Bitrate der Anwendung. Außerdem wurde eine Reihe von zusätzlichen Statistikfunktionen (siehe Tabelle 6.1) implementiert, die für die Auswertung der Ergebnisse der Handoverentscheidung von Relevanz sind. Eine weitere zusätzliche Implementierung ermöglicht die Anbindung von OMNeT++/INET an das FLASHED-Framework. Dabei wird eine JAR-Datei, die das FLASHED-Framework enthält, über die C++-Funktion *popen()* aufgerufen. Beim Aufruf werden die Charakteristiken der verfügbaren APs als Argumente an das FLASHED-Framework übergeben. Im FLASHED-Framework wird die Handoverentscheidung getroffen und die MAC-Adresse des besten APs an OMNeT++/INET zurückgesendet.

Zusammengefasst ist das Ergebnis dieser Implementierungen ein Werkzeug für die Simulation des multikriteriellen Handovers innerhalb von OMNeT++/INET (veröffentlicht in [INET17a]), welches für die weitere Forschung in diesem Bereich eingesetzt werden kann.





## 7 Evaluierung der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen und des Frameworks

Für die Evaluierung der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen aus Kapitel 4 und des FLASHED-Frameworks aus Kapitel 5 wurde die weiterentwickelte Version der Simulationsumgebung OMNeT++/INET (beschrieben in Kapitel 6.3.6) verwendet. In diesem Kapitel werden die Szenarien und die Ergebnisse der Simulationen dargestellt.

### 7.1 Beschreibung von Simulationsaufbau

In OMNeT++/INET wird eine WLAN-basierte Kommunikationsumgebung simuliert (dargestellt in Abbildung 6.1). Es werden drei Szenarien mit unterschiedlicher Anzahl von STAs und mit den unterschiedlichen Aufkommen des Anwendungsverkehrs definiert. Die Szenarien haben eine verschachtelte Struktur bestehend aus Modi, Submodi und Durchläufen. Jedes Szenario besteht aus fünf Modi, bei denen verschiedene Entscheidungsalgorithmen verwendet werden. Weiterhin beinhaltet jeder Modus bis auf den Lastverteilungsmodus fünf Submodi mit diversen MCDM-Methoden. Jeder Submodus enthält seinerseits zehn sogenannte Durchläufe, bei denen die APs hinsichtlich den Kosten und den maximal verfügbaren Bitraten verschieden konfiguriert sind.

In Tabelle 7.1 werden die Parameterwerte der simulierten Kommunikationsumgebung vorgestellt.

Für die Modellierung der STAs wurde das weiterentwickelte INET-Modul *WirelessHost* benutzt. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Weiterentwicklungen des INET-Moduls *WirelessHost* wurden in Abschnitt 6.3 beschrieben.

Die zwei Bewegungsmuster aus INET *TractorMobility* und *MassMobility* [INET17c] mit der Parametrierung aus Tabelle 7.2 werden in den STAs verwendet. Der *TractorMobility* wurde dabei so konfiguriert, dass eine STA mit diesem Bewegungsmuster

| Parameter                       | Wert        |
|---------------------------------|-------------|
| Simulationsdauer                | 200 s       |
| Simulationsbereich              | 700x700 m   |
| AP-Anzahl                       | 6           |
| WLAN-Standard                   | 802.11g     |
| Benutzte Radiokanäle            | 1, 5, 9, 13 |
| Sendeleistung                   | 25 mW       |
| RSS-Schwellenwert               | −85 dBm     |
| SNIR-Schwellenwert              | 2,51 dB     |
| Beacon-Interval                 | 50 ms       |
| Interval für den regulären Scan | 1,5 s       |
| Geschwindigkeit der STAs        | 20 m/s      |

Tabelle 7.1: Parameterwerte der simulierten Kommunikationsumgebung

immer den gleichen Weg nimmt und in die Reichweite jedes APs kommt. Im Gegensatz dazu nimmt eine STA mit dem *MassMobility*-Bewegungsmuster zufällige Wege.

| Parameter              | Wert                    |
|------------------------|-------------------------|
| <b>TractorMobility</b> |                         |
| x1                     | 150 m                   |
| y1                     | 180 m                   |
| x2                     | 650 m                   |
| y2                     | 600 m                   |
| rowCount               | 4                       |
| speed                  | 20 m/s                  |
| <b>MassMobility</b>    |                         |
| changeInterval         | normal(2 s, 0,5 s)      |
| changeAngleBy          | normal(0 Grad, 30 Grad) |
| speed                  | normal(15 m/s, 5 m/s)   |

Tabelle 7.2: Parametrierung der Bewegungsmuster

Die Anwendungen von Typen *Streaming* und *Conversational* werden in jeder STA mit dem INET-Modul *UDPBasicApp* [INET17c] simuliert: *StreamingApp* (eine Streaming-Anwendung) und *VoIPApp* (eine VoIP-Anwendung). Für *StreamingApp* wurden mehrere Bitraten angelehnt an [yout17] definiert. Die Anwendung schaltet zwischen diesen Bitraten abhängig von verfügbarer Bitrate des assoziierten APs um. Für *VoIPApp* wird eine statische Bitrate von 100 kbit/s konfiguriert. Tabelle 7.3 zeigt die Anwendungsbitraten pro Szenario. Die Szenarien werden im nächsten Absatz erklärt.

Für die Simulationen werden drei Szenarien mit unterschiedlicher Anzahl von STAs und den unterschiedlichen Aufkommen des Anwendungsverkehrs festgelegt und in Tabelle 7.3 präsentiert. Im ersten Szenario wurde eine STA eingesetzt. Im zweiten und dritten Szenario kamen sieben STAs zum Einsatz. Für das erste Szenario wird das *TractorMobility*-Bewegungsmuster für die STA konfiguriert. Im zweiten und dritten Szenario werden eine sogenannte Haupt-STA und sechs sogenannte Background-STAs

eingrichtet. Für die Haupt-STA wird das *TracktorMobility*-Bewegungsmuster und für die Background-STAs das *MassMobility*-Bewegungsmuster konfiguriert. Sowohl die Haupt-STA als auch die Background-STAs nutzen die gleichen Entscheidungsalgorithmen entsprechend dem jeweiligen Szenario, Modus und Submodus. In der Haupt-STA werden während der Simulationen die Werte von mehreren Metriken für die Analyse der Entscheidungsalgorithmen gesammelt. Die Aufgabe der Background-STAs ist die Generierung des Hintergrundverkehrs.

| Szenarioname     | Anzahl der STAs | Bitraten der Anwendungen, kbit/s      |                |
|------------------|-----------------|---------------------------------------|----------------|
|                  |                 | <i>StreamingApp</i>                   | <i>VoIPApp</i> |
| LowBR_Single_STA | 1               | 300, 400, 500, 600, 700, 800          | 100            |
| LowBR_Mult_STAs  | 7               | 300, 400, 500, 600, 700, 800          | 100            |
| HighBR_Mult_STA  | 7               | 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2000 | 100            |

Tabelle 7.3: Szenarien für die Simulationen

Fünf Modi werden für jedes Szenario definiert und in Tabelle 7.4 aufgelistet. Der erste Modus ist der Referenzmodus, in dem die Entscheidungen nach dem traditionellen MCDM-Prozess (siehe Abschnitt 2.2) getroffen werden. In Modi 2, 3 und 4 werden die besten Wege mittels der einzelnen Algorithmen ORA, AORA und LBA berechnet. Im fünften Modus geht es um eine Kompromissentscheidung, bei der die Perspektiven sowohl des Nutzers als auch des Netzbetreibers berücksichtigt werden. Dabei werden die Perspektiven identisch priorisiert. Den Entscheidungsalgorithmen werden Gewichte wie folgt zugewiesen: ORA – 0,5; AORA – 0,25; LBA – 0,25. Die mittels ORA, AORA und LBA berechneten Gesamtnutzwerte der verfügbaren Kommunikationswege werden, wie in Abschnitt 5.2.5 beschrieben, als eine gewichtete Summe zusammengesetzt. Alle Modi bis auf den vierten Modus (Lastverteilungsmodus) bestehen aus fünf Submodi mit verschiedenen MCDM-Methoden.

| Nr. | Modus               | Perspektive                        | Algorithmus                        | Submodi (MCDM-Methoden)      |
|-----|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 1   | Referenz            | Nutzer                             | Traditioneller MCDM                | WSM, WPM, GRA, TOPSIS, VIKOR |
| 2   | Überschussred.      | Nutzer                             | ORA                                | WSM, WPM, GRA, TOPSIS, VIKOR |
| 3   | Agr. Überschussred. | Netzbetreiber                      | AORA                               | WSM, WPM, GRA, TOPSIS, VIKOR |
| 4   | Lastverteilung      | Netzbetreiber                      | LBA                                |                              |
| 5   | Kompromiss          | Nutzer(0,5)+<br>Netzbetreiber(0,5) | ORA(0,5), AORA(0,25),<br>LBA(0,25) | WSM, WPM, GRA, TOPSIS, VIKOR |

Tabelle 7.4: Modi für die Simulationen

Jeder Submodi beinhaltet zehn sogenannte Durchläufe. Für die Durchläufe werden unterschiedliche Kosten und maximal verfügbare Bitraten für die APs festgelegt und in Tabelle 7.5 aufgelistet. Die Kosten wurden im Wertebereich  $[0, 100]$  mit dem Zufallszahlengenerator *java.util.Random* [Rand16] im Gleichverteilungsmodus generiert.

Die unterstützten Bitraten 1, 2, 5, 5, 6, 9, 11, 12 und 18 Mbit/s aus dem Standard 802.11g [IEEE03] wurden mit Hilfe von [rand17] zufällig sortiert.

| AP-Name | Kosten  |    |    |     |    |    |    |    |    |    | Maximale Bitrate |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
|---------|---------|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|
|         | C/MByte |    |    |     |    |    |    |    |    |    | Mbit/s           |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
| AP1     | 88      | 49 | 35 | 100 | 3  | 70 | 5  | 11 | 14 | 85 | 18               | 12  | 5,5 | 6   | 5,5 | 2  | 6   | 9   | 11 | 11 |
| AP2     | 13      | 58 | 81 | 45  | 53 | 3  | 63 | 67 | 49 | 50 | 9                | 1   | 18  | 5,5 | 12  | 11 | 5,5 | 5,5 | 6  | 2  |
| AP3     | 2       | 71 | 64 | 21  | 57 | 54 | 45 | 95 | 3  | 11 | 11               | 9   | 9   | 12  | 5,5 | 2  | 12  | 18  | 6  | 1  |
| AP4     | 31      | 77 | 44 | 10  | 49 | 36 | 33 | 78 | 97 | 1  | 12               | 5,5 | 9   | 11  | 6   | 2  | 1   | 11  | 18 | 12 |
| AP5     | 76      | 74 | 74 | 72  | 36 | 14 | 83 | 14 | 61 | 17 | 2                | 9   | 12  | 6   | 1   | 12 | 5,5 | 11  | 18 | 1  |
| AP6     | 85      | 19 | 12 | 30  | 19 | 85 | 77 | 22 | 82 | 89 | 2                | 12  | 11  | 6   | 5,5 | 18 | 6   | 18  | 9  | 1  |

Tabelle 7.5: Kosten und maximale Bitraten für APs

Für diese drei Szenarien und diese fünf Modi wurde die FLASHED-Datenbank, wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben ist, gefüllt. Für alle Szenarien und Modi bis auf ein paar Ausnahmen werden die gleichen Konfigurationsdaten benutzt. Die Ausnahmen bilden die Gewichte der Perspektiven, die Gewichte der Ziele und die anwendungsspezifischen Konfigurationen der gesättigten Bereiche.

Die Gewichte der Perspektiven und Ziele pro Modus werden in Tabelle 7.6 vorgestellt. Entsprechend dieser Tabelle werden die FLASHED-Datenbanktabellen *Perspective* und *Goal* für jeden Modus konfiguriert.

| N | Modus                | Perspektive     |         | Ziel           |         |
|---|----------------------|-----------------|---------|----------------|---------|
|   |                      | Name            | Gewicht | Name           | Gewicht |
| 1 | Referenz             | User            | 1       | QoS            | 0,5     |
|   |                      |                 |         | Cost           | 0,5     |
|   |                      | ServiceProvider | 0       | OverfReduction | 0       |
|   |                      |                 |         | LoadBalancing  | 0       |
| 2 | Überschussred.       | User            | 1       | QoS            | 0,5     |
|   |                      |                 |         | Cost           | 0,5     |
|   |                      | ServiceProvider | 0       | OverfReduction | 0       |
|   |                      |                 |         | LoadBalancing  | 0       |
| 3 | Aggr. Überschussred. | User            | 0       | QoS            | 0       |
|   |                      |                 |         | Cost           | 0       |
|   |                      | ServiceProvider | 1       | OverfReduction | 1       |
|   |                      |                 |         | LoadBalancing  | 0       |
| 4 | Lastverteilung       | User            | 0       | QoS            | 0       |
|   |                      |                 |         | Cost           | 0       |
|   |                      | ServiceProvider | 1       | OverfReduction | 0       |
|   |                      |                 |         | LoadBalancing  | 1       |
| 5 | Kompromiss           | User            | 0,5     | QoS            | 0,5     |
|   |                      |                 |         | Cost           | 0,5     |
|   |                      | ServiceProvider | 0,5     | OverfReduction | 0,5     |
|   |                      |                 |         | LoadBalancing  | 0,5     |

Tabelle 7.6: Priorisierung der Perspektiven und Ziele pro Modus

Die Konfiguration der gesättigten Bereiche der Kriterien *availBR\_QoS\_defUser* und *availBR\_OR\_Admin* für *StreamingApp* ändert sich pro Szenario entsprechend der maximalen Anwendungsbitraten aus Tabelle 7.3. Die szenarienspezifischen gesättigten Bereiche für diese zwei Kriterien für die Anwendung *StreamingApp* sind in Tabelle 7.7 vorgestellt. Entsprechend dieser Tabelle wird die FLASHED-Datenbanktabelle *Criterion\_specific\_per\_app* pro Szenario konfiguriert. Im Gegensatz dazu haben diese zwei Kriterien für die Anwendung *VoIPApp* den konstanten gesättigten Bereich von 100 bis 18000 kbit/s. Dabei ist es wichtig anzumerken, dass für den Referenzmodus bei allen Szenarien kein gesättigter Bereich konfiguriert wird, da die traditionelle Art des MCDM-Prozesses keine gesättigten Bereiche vorsieht.

| Szenarioname     | Kriterium           | gesättigter Bereich, kbit/s |
|------------------|---------------------|-----------------------------|
| LowBR_Single_STA | availBR_QoS_defUser | 800-18000                   |
|                  | availBR_OR_Admin    | 800-18000                   |
| LowBR_Mult_STA   | availBR_QoS_defUser | 800-18000                   |
|                  | availBR_OR_Admin    | 800-18000                   |
| HighBR_Mult_STA  | availBR_QoS_defUser | 2000-18000                  |
|                  | availBR_OR_Admin    | 2000-18000                  |

Tabelle 7.7: Konfiguration der gesättigten Bereiche pro Szenario für die Anwendung *StreamingApp*

Die Kriterienkonfigurationen für die Szenarien *LowBR\_Single\_STA* und *LowBR\_Mult\_STAs* sind in Tabelle 7.8 und die Kriterienkonfigurationen für das Szenario *HighBR\_Mult\_STA* in Tabelle 7.9 präsentiert. Die vorgestellten Tabelleninhalte werden vom vorgeschlagenen MCDM-Algorithmus (siehe Abbildung 5.9) in den Schritten 11 und 12 berechnet. In diesen Schritten werden die Parameterwerte der anwendungsspezifischen Ziele und Kriterien nach dem Algorithmus aus Abschnitt 5.2.6 zusammengesetzt.

Die Tabelleninhalte unterscheiden sich nur in zwei Parameterwerten, nämlich im gesättigten Bereich und im Nutzwert im gesättigten Bereich. Die untere Grenze des gesättigten Bereiches ergibt sich aus der Summe der maximalen Bitraten der aktiven Anwendungen. Die maximale Bitrate von *StreamingApp* für das Szenario *HighBR\_Mult\_STA* unterscheidet sich von den restlichen zwei Szenarien. Das hat unterschiedliche gesättigte Bereiche und Nutzwerte in den gesättigten Bereichen zur Folge.

Die Konfigurationsparameter in Tabellen 7.8 und 7.9 sind in drei Sektionen für drei Modi unterteilt. Dabei werden im Modus Überschussreduzierung zusätzlich zu seinen Konfigurationsparametern auch die Konfigurationsparameter des Referenzmodus benutzt. Im Modus Aggressive Überschussreduzierung werden zusätzlich zu dem Parameter (*minDegOptRatio*) die Konfigurationsparameter der Modi Überschussreduzierung und Referenz gebraucht.

| Konfigurationsparameter                                    | Verzögerung             | Jitter                  | PV                    | Verfügbare Bitrate        | Kosten              |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|
| <b>Referenzmodus</b>                                       |                         |                         |                       |                           |                     |
| Gewicht [0, 1]   | 0,138                   | 0,174                   | 0,024                 | 0,264                     | 0,4                 |
| Zulässiger Bereich   | 0-0,050                 | 0-0,030                 | 0-0,01                | 520-18000                 | 0-200               |
| Nutzenfunktion   | $\frac{0,050-x}{0,050}$ | $\frac{0,030-x}{0,030}$ | $\frac{0,01-x}{0,01}$ | $\frac{x-520}{18000-520}$ | $\frac{200-x}{200}$ |
| <b>Überschussreduzierungsmodus</b>                         |                         |                         |                       |                           |                     |
| Gesättigter Bereich  |                         |                         |                       | 1170-18000                |                     |
| Nutzwert im gesättigten Bereich, [0, 1]                    |                         |                         |                       | 0,0361                    |                     |
| <b>Aggr. Überschussreduzierungsmodus, minDegOptRatio=3</b> |                         |                         |                       |                           |                     |

Tabelle 7.8: Parametrierung der Kriterien für die Szenarien *LowBR\_Single\_STA* und *LowBR\_Mult\_STAs*

| Konfigurationsparameter                                    | Verzögerung             | Jitter                  | PV                    | Verfügbare Bitrate        | Kosten              |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|
| <b>Referenzmodus</b>                                       |                         |                         |                       |                           |                     |
| Gewicht [0, 1]   | 0,138                   | 0,174                   | 0,024                 | 0,264                     | 0,4                 |
| Zulässiger Bereich   | 0-0,050                 | 0-0,030                 | 0-0,01                | 520-18000                 | 0-200               |
| Nutzenfunktion   | $\frac{0,050-x}{0,050}$ | $\frac{0,030-x}{0,030}$ | $\frac{0,01-x}{0,01}$ | $\frac{x-520}{18000-520}$ | $\frac{200-x}{200}$ |
| <b>Überschussreduzierungsmodus</b>                         |                         |                         |                       |                           |                     |
| Gesättigter Bereich  |                         |                         |                       | 2730 -18000               |                     |
| Nutzwert im gesättigten Bereich, [0, 1]                    |                         |                         |                       | 0,1264                    |                     |
| <b>Aggr. Überschussreduzierungsmodus, minDegOptRatio=3</b> |                         |                         |                       |                           |                     |

Tabelle 7.9: Parametrierung der Kriterien für das Szenario *HighBR\_Mult\_STA*

Für die Bewertung der Entscheidungsalgorithmen wurden diverse Metriken definiert. Die Metriken wurden in die Gruppen Nutzerperspektive und Netzbetreiberperspektive unterteilt. Die Gruppe Nutzerperspektive beinhaltet Entscheidungskriterien wie Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate, verfügbare Bitrate und Kosten. Dieser Gruppe gehören die zwei weiteren Metriken STA-Last und Anwendungsbitrate an. Bei der Metrik STA-Last geht es um die INET Statistikfunktion *throughput*, die den Volumen des Datenverkehrs auf der STA misst. Die Metrik Anwendungsbitrate wurde im Rahmen dieser Dissertation in OMNeT++/INET implementiert. Die Anwendungsbitrate ist die aktuell konfigurierte Bitrate der aktiven Anwendungen, die bei jeder Handoverentscheidung auf der STA ermittelt wird. Der zweiten Gruppe Netzbetreiberperspektive wurden folgende Metriken zugeordnet, die für Netzbetreiber relevant sind: Handoveranzahl (HO-Anzahl), Überschusskoeffizient (Übersch.-Koeff.) und Lastverteilungsindex (LV-Index). Für die Metriken Handoveranzahl und Überschusskoeffizient wurde Statistikfunktionen jeweils *numberOfHos*

und *relOverfOfAvailBitrate* entwickelt und in Abschnitt 6.3.5 in Tabelle 6.1 beschrieben. Die Statistikfunktion Lastverteilungsindex wurde in Abschnitt 6.3.3 dargestellt.

Für die oben beschriebenen Szenarien wurden Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden in folgenden Abschnitten in Tabellen 7.10, 7.11 und 7.12 vorgestellt und diskutiert. Der Aufbau dieser Tabellen hat gewisse Ähnlichkeiten mit Tabellen 4.10 und 4.11 aus Abschnitt 4. Das Ziel der Tabellen 4.10 und 4.11 war die Darstellung der Funktionsweise von ORA und AORA an Ergebnissen von numerischen Simulationen. Tabellen 7.10, 7.11 und 7.12 beinhalten dagegen die Ergebnisse der OMNeT++/INET-basierten Simulationen.

## 7.2 Simulationsergebnisse für das Szenario **LowBR\_Single\_STA**

In Tabelle 7.10 werden die während der Simulationen berechneten Durchschnittswerte der besten Kommunikationswege pro Modus und pro Submodus (MCDM-Methode) für die Metriken der Nutzer- und Netzbetreiberperspektive für das Szenario *LowBR\_Single\_STA* präsentiert.

Für jeden Modus und für jedes Kriterium wurden die Standardabweichungen  $\sigma$  für die Ergebnisse verschiedener MCDM-Methoden berechnet und in Tabelle 7.10 vorgestellt. Die Unterschiede und die Standardabweichungen sind gering. Die einzige Ausnahme bildet die MCDM-Methode VIKOR, die wesentlich höhere Werte für die Metrik Handoveranzahl für die ersten zwei Modi im Vergleich zu den restlichen MCDM-Methoden liefert. Der Grund für diese Abweichung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden.

Die Werte für die ersten drei Metriken Verzögerung (Verz.), Jitter und Paketverlustrate (PV) weisen geringe Unterschiede sowohl zwischen den MCDM-Methoden als auch zwischen den Modi auf. Deswegen werden diese Metriken für die Evaluierung der vorgeschlagenen Algorithmen und des FLASHED-Frameworks als unbedeutend betrachtet und nicht weiter analysiert.

Dagegen unterscheiden sich die Werte der Metriken verfügbare Bitrate (VBR) und Kosten in verschiedenen Modi stark und zeigen einen gewünschten Trend. So sinkt die verfügbare Bitrate im Modus Überschussreduzierung im Vergleich zum Referenzmodus. Gleichzeitig sinken auch die Kostenwerte. Diese Werteänderungen bestätigen die Richtigkeit der Funktionsweise von ORA (siehe Abschnitt 4.2) mit seinem Funktionsprinzip: das Anstreben einer Werteverbesserung der unbeschränkten Kriterien (in diesem Fall – Kosten) durch eine Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien (in diesem Fall – verfügbare Bitrate).

Im Modus aggressive Überschussreduzierung sinkt die verfügbare Bitrate im Vergleich zu dem Überschussreduzierungsmodus. Gleichzeitig verschlechtern sich die Kostenwerte. Solche Ergebnisse stehen im Einklang mit dem AORA-Funktionsprinzip (siehe Abschnitt 4.3), bei dem eine im Vergleich zu ORA zusätzliche Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien (in diesem Fall – verfügbare Bitrate) durch eine Degradierung der Kriterienwerte der unbeschränkten Kriterien (in diesem Fall – Kosten) angestrebt wird.

Der Lastverteilungsmodus zeigt wie erwartet die höchste verfügbare Bitrate und die ungünstigsten Kostenwerte im Vergleich zu allen anderen Modi. Solche Werte sind die Folge des Funktionsprinzips von LBA (siehe Abschnitt 5.2.4), bei dem während der Entscheidungsphase allein das Kriterium Lastverteilungsindex berücksichtigt wird. Das kann zur Wertever schlechterung bei restlichen Kriterien führen.

Die Werte der restlichen zwei nutzerrelevanten Metriken STA-Last und Anwendungsbitrate (Anw.-Bitrate) folgen eben so dem gewünschten Trend. Sie sinken im Vergleich zu dem Referenzmodus in den Modi Überschussreduzierung und aggressive Überschussreduzierung und sie steigen im Lastverteilungsmodus.

Als Nächstes werden die Metrikwerte der Netzbetreiberperspektive analysiert. Die Werte der Metrik Handoveranzahl ändern sich ja nach Modus unwesentlich. Die Optimierungsziele Überschussreduzierung und Lastverteilung (beide bezogen auf die verfügbare Bitrate) stehen im Konflikt. Bei Überschussreduzierung wird ein Kommunikationsweg mit genügend aber mit möglichst wenig überschüssiger Bitrate präferiert. Im Gegensatz dazu wird bei der Lastverteilung als Optimierungsziel ein Kommunikationsweg mit der höchsten verfügbaren Bitrate bevorzugt, was aber zur Auswahl eines Weges mit überschüssiger Bitrate führen kann. Deswegen ist bei den Werten der Metriken Überschusskoeffizient und Lastverteilungsindex eine Korrelation zu sehen. Obwohl die Werte dieser Metriken eine direkte Korrelation zeigen, geht es um eine inverse Korrelation, da die Metrik Überschusskoeffizient einen Kostencharakter (wird minimiert) und die Metrik Lastverteilungsindex einen Nutzencharakter (wird maximiert) hat.

Die Werte des Überschusskoeffizienten steigen in den Modi Überschussreduzierung und aggressive Überschussreduzierung und sinken im Lastverteilungsmodus. Die Werte des Lastverteilungsindex verschlechtern sich dagegen in den Modi Überschussreduzierung und aggressive Überschussreduzierung und haben die günstigsten Werte im Lastverteilungsmodus.

Beim Kompromissmodus liegen die Werte aller Metriken zwischen den Werten der Modi Überschussreduzierung, aggressive Überschussreduzierung und Lastverteilung. Ein solches Ergebnis ist nachvollziehbar und kann mit dem gleichzeitigen Einsatz von den drei Entscheidungsalgorithmen ORA, AORA und LBA (siehe Abschnitt 5.2.5)



und demzufolge der Verteilung der Gewichte zwischen drei unterschiedlichen Optimierungszielen wie Verbesserung der Kriterienwerte durch eine Überschussreduzierung, eine Überschussreduzierung durch eine Degradierung der Kriterienwerte und eine Verbesserung der Lastverteilung erklärt werden.

Für eine bessere Anschaulichkeit werden die Unterschiede der Nutzwerte der Metriken zwischen den Modi in Grafik 7.1 dargestellt. Die Nutzwerte der Metriken wurden durch die Normierung auf die zulässigen Bereiche der jeweiligen Metriken berechnet. Dabei wurden die Nutzwerte der Modi von 2 bis 5 mit den Nutzwerten des Referenzmodus verglichen. Da, wie es oben schon erwähnt wurde, die Metrikwerte verschiedener MCDM-Methoden keine großen Unterschiede aufweisen, wurden in Grafik 7.1 die Messwerte nur für eine MCDM-Methode (GRA) vorgestellt.

| Modus/<br>MCDM-Meth.                          | Nutzerperspektive |             |              |               |                   | Netzwerkbetreiberperspektive |                        |           |                           |                    |
|---|-------------------|-------------|--------------|---------------|-------------------|------------------------------|------------------------|-----------|---------------------------|--------------------|
|   | Verz.<br>s        | Jitter<br>s | PV<br>[0, 1] | VBR<br>kbit/s | Kosten<br>C/MBYTE | STA-Last<br>kbit/s           | Anw.-Bitrate<br>kbit/s | HO-Anzahl | Übersch.-Koeff.<br>[0, 1] | LV-Index<br>[0, 1] |
| <b>Referenzmodus</b>                          |                   |             |              |               |                   |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,009635          | 0,006317    | 0,000000006  | 9452,070      | 39,243            | 741,032                      | 867,249                | 7,8       | 0,807721779               | 0,215494456        |
| WPM   | 0,009327          | 0,006103    | 0,000000067  | 9613,044      | 41,284            | 747,721                      | 874,825                | 7,7       | 0,829755703               | 0,216722057        |
| TOPSIS  | 0,009832          | 0,006418    | 0,000000000  | 9450,006      | 39,321            | 741,071                      | 867,024                | 7,8       | 0,806892874               | 0,215369503        |
| GRA   | 0,009691          | 0,006357    | 0,000000000  | 9465,275      | 39,167            | 740,863                      | 867,219                | 7,8       | 0,808413324               | 0,215493802        |
| VIKOR   | 0,009801          | 0,006435    | 0,000000693  | 8856,156      | 40,089            | 733,558                      | 864,998                | 18,8      | 0,790806332               | 0,214972562        |
| $\sigma$                                      | 0,000201          | 0,000133    | 0,000000303  | 293,804       | 0,897             | 5,011                        | 3,787                  | 4,9       | 0,013854865               | 0,000657208        |
| <b>Überschussreduzierungsmodus</b>            |                   |             |              |               |                   |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,010583          | 0,006924    | 0,000000067  | 8236,571      | 35,931            | 734,292                      | 859,313                | 7,8       | 0,765996226               | 0,209565527        |
| WPM   | 0,010125          | 0,006569    | 0,000000006  | 8515,535      | 36,803            | 741,910                      | 866,730                | 7,7       | 0,795424055               | 0,211504963        |
| TOPSIS  | 0,010583          | 0,006924    | 0,000000067  | 8236,571      | 35,931            | 734,292                      | 859,313                | 7,8       | 0,765996226               | 0,209565527        |
| GRA   | 0,010583          | 0,006924    | 0,000000067  | 8236,571      | 35,931            | 734,292                      | 859,313                | 7,8       | 0,765996226               | 0,209565527        |
| VIKOR   | 0,009679          | 0,006392    | 0,000000007  | 8395,706      | 37,339            | 738,818                      | 865,453                | 13,1      | 0,787198813               | 0,210789086        |
| $\sigma$                                      | 0,000405          | 0,000250    | 0,000000034  | 126,103       | 0,652             | 3,500                        | 3,740                  | 2,4       | 0,014167383               | 0,000902441        |
| <b>Aggressive Überschussreduzierungsmodus</b> |                   |             |              |               |                   |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,010295          | 0,006750    | 0,000000006  | 7599,624      | 37,466            | 722,998                      | 854,537                | 8,4       | 0,738700632               | 0,204713223        |
| WPM   | 0,010295          | 0,006750    | 0,000000006  | 7599,624      | 37,466            | 722,998                      | 854,537                | 8,4       | 0,738700632               | 0,204713223        |
| TOPSIS  | 0,010295          | 0,006750    | 0,000000006  | 7599,624      | 37,466            | 722,998                      | 854,537                | 8,4       | 0,738700632               | 0,204713223        |
| GRA   | 0,010295          | 0,006750    | 0,000000006  | 7599,624      | 37,466            | 722,998                      | 854,537                | 8,4       | 0,738700632               | 0,204713223        |
| VIKOR   | 0,010160          | 0,006635    | 0,000000723  | 7556,984      | 37,460            | 720,692                      | 854,594                | 8,9       | 0,738259798               | 0,204619965        |
| $\sigma$                                      | 0,000060          | 0,000051    | 0,000000321  | 19,069        | 0,002             | 1,031                        | 0,025                  | 0,2       | 0,000197147               | 0,000041706        |
| <b>Lastverteilungsmodus</b>                   |                   |             |              |               |                   |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,009656          | 0,006227    | 0,000775538  | 9993,280      | 49,824            | 746,312                      | 874,958                | 7,8       | 0,832482030               | 0,217708320        |
| <b>Kompromissmodus</b>                        |                   |             |              |               |                   |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,010197          | 0,006713    | 0,000000006  | 7857,315      | 36,941            | 725,094                      | 856,849                | 8,1       | 0,753494958               | 0,207573558        |
| WPM   | 0,009822          | 0,006467    | 0,000000066  | 7783,098      | 37,403            | 723,937                      | 858,586                | 9,4       | 0,754569064               | 0,207499508        |
| TOPSIS  | 0,010467          | 0,006847    | 0,000000006  | 8250,309      | 36,073            | 732,859                      | 859,122                | 7,9       | 0,765493462               | 0,209559904        |
| GRA   | 0,010467          | 0,006847    | 0,000000006  | 8250,309      | 36,073            | 732,859                      | 859,122                | 7,9       | 0,765493462               | 0,209559904        |
| VIKOR   | 0,010418          | 0,006842    | 0,000000770  | 8229,791      | 36,213            | 733,876                      | 860,070                | 9,3       | 0,767978245               | 0,209608267        |
| $\sigma$                                      | 0,000276          | 0,000164    | 0,000000336  | 233,461       | 0,602             | 4,790                        | 1,189                  | 0,8       | 0,006817942               | 0,001117557        |

Tabelle 7.10: Durchschnittswerte der besten Kommunikationswege pro Modus und pro MCDM-Methode für die Kriterien der Nutzer- und Netzwerkbetreiberperspektive für das Szenario *LowBR\_Single\_STA*

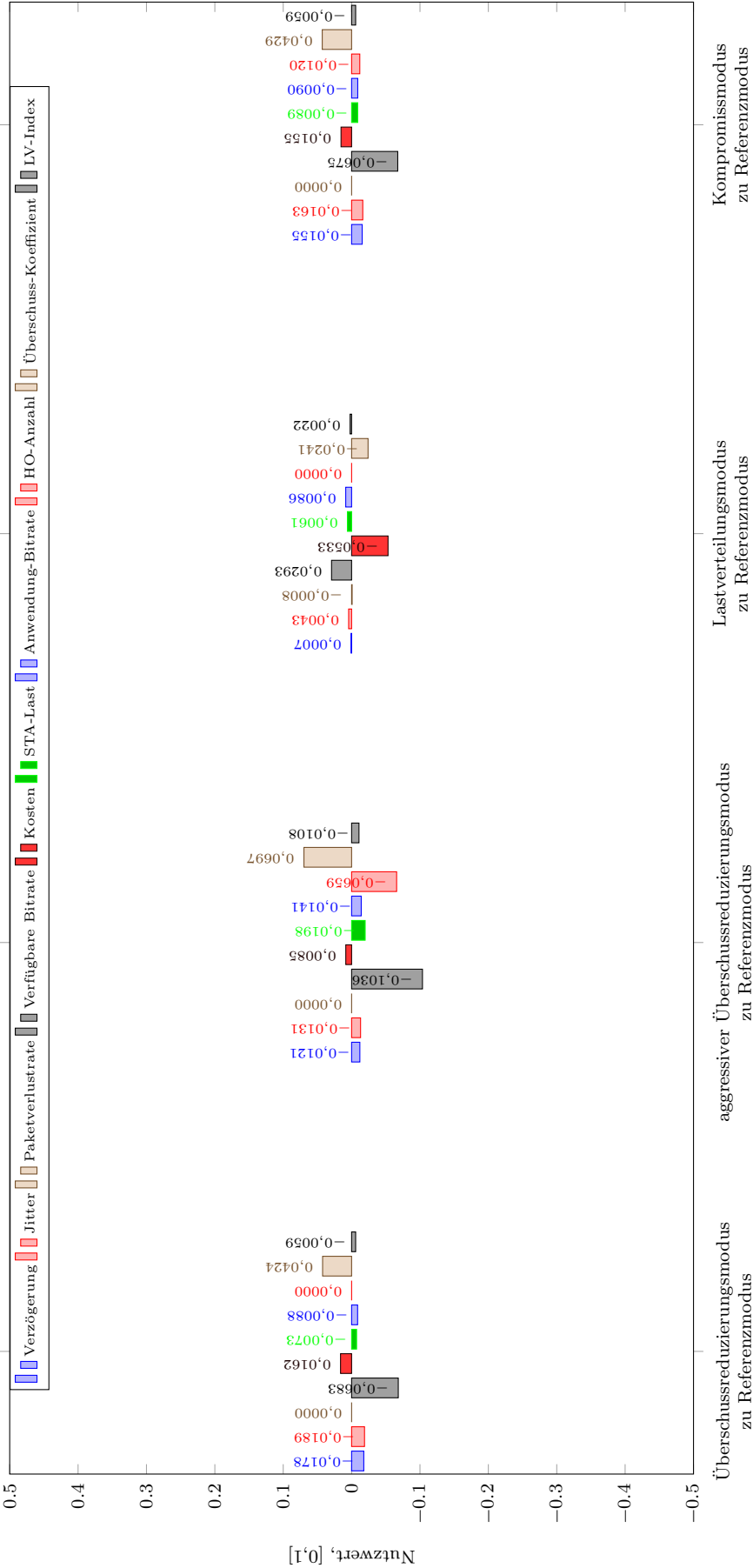


Abbildung 7.1: Änderungen der Nutzwerte der Metriken für das Szenario *LowBR\_Single\_STA* von verschiedenen Modi relativ zu dem Referenzmodus

## 7.3 Simulationsergebnisse für das Szenario **LowBR\_Mult\_STAs**

In Tabelle 7.11 werden die während der Simulationen berechneten Durchschnittswerte der besten Kommunikationswege pro Modus und pro Submodus (MCDM-Methode) für die Metriken der Nutzer- und Netzbetreiberperspektive für das Szenario *LowBR\_Mult\_STA* präsentiert.

Die Werte der Metriken zeigen in diesem Szenario die gleichen Trends wie im Szenario *LowBR\_Single\_STA* aus dem vorherigen Abschnitt. Allerdings fallen die Überschussreduzierung der verfügbaren Bitrate und die Kostenreduzierung geringer aus. Zum Beispiel beträgt die normierte Überschussreduzierung (normiert auf den Bereich  $[0,1]$ ) für die verfügbare Bitrate bei Verwendung von AORA und GRA relativ zum Referenzmodus im *LowBR\_Single\_STA*-Szenario 10,3 % und im *LowBR\_Mult\_STAs*-Szenario nur 2,6 %. Dieser Unterschied wird im Szenario *LowBR\_Mult\_STAs* durch den zusätzlichen Anwendungsverkehr verursacht, der durch die Background-STAs generiert wird. Durch diesen zusätzlichen Anwendungsverkehr verringert sich die verfügbare Bitrate der APs. Dadurch sinkt der potentielle Überschuss und demzufolge auch das Potential für eine Überschussreduzierung. Diese Erklärung bestätigen die Werte des Überschusskoeffizienten, die beim Referenzmodus im Szenario *LowBR\_Mult\_STA* im Vergleich zum Szenario *LowBR\_Single\_STA* geringer ausfallen.

Auch wie für das vorherige Szenario werden die Unterschiede der Nutzwerte von Metriken zwischen den Modi berechnet mit der MCDM-Methode GRA für eine bessere Anschaulichkeit in Grafik 7.2 dargestellt. Dabei wurden die Nutzwerte der Metriken der Modi von 2 bis 5 mit den Nutzwerten der Metriken des Referenzmodus verglichen.

| Modus/<br>MCDM-Meth.                   |          | Nutzerperspektive |             |              |               |                   | Netzwerkbetreiberperspektive |                        |             |                           |
|--|----------|-------------------|-------------|--------------|---------------|-------------------|------------------------------|------------------------|-------------|---------------------------|
|  |          | Verz.<br>s        | Jitter<br>s | PV<br>[0, 1] | VBR<br>kbit/s | Kosten<br>C/MByte | STA-Last<br>kbit/s           | Anw.-Bitrate<br>kbit/s | HO-Anzahl   | Übersch.-Koeff.<br>[0, 1] |
| Referenzmodus                          |          |                   |             |              |               |                   |                              |                        |             |                           |
| WSM                                    | 0,028538 | 0,017308          | 0,045021660 | 8004,109     | 45,469        | 436,687           | 871,703                      | 22,1                   | 0,710232876 | 0,458708168               |
| WPM                                    | 0,025044 | 0,015575          | 0,041187488 | 8071,356     | 45,943        | 445,731           | 868,514                      | 23,9                   | 0,721713308 | 0,445090730               |
| TOPSIS                                 | 0,028594 | 0,017331          | 0,045256551 | 7997,423     | 45,717        | 437,487           | 871,640                      | 22,0                   | 0,709715641 | 0,459699458               |
| GRA                                    | 0,029434 | 0,017757          | 0,046265460 | 7930,592     | 46,116        | 415,242           | 870,670                      | 22,0                   | 0,703526929 | 0,472505851               |
| VIKOR                                  | 0,027303 | 0,016990          | 0,048195122 | 7901,397     | 48,391        | 390,695           | 870,776                      | 23,6                   | 0,725569164 | 0,437469066               |
| σ                                      | 0,001709 | 0,000837          | 0,002561256 | 66,793       | 1,178         | 22,327            | 1,291                        | 0,9                    | 0,009157756 | 0,013668863               |
| Überschussreduzierungsmodus            |          |                   |             |              |               |                   |                              |                        |             |                           |
| WSM                                    | 0,027752 | 0,016819          | 0,031591200 | 7620,865     | 43,861        | 471,067           | 864,383                      | 21,8                   | 0,698102080 | 0,450096722               |
| WPM                                    | 0,027533 | 0,017156          | 0,036318502 | 7623,237     | 44,085        | 470,140           | 866,892                      | 20,3                   | 0,698102080 | 0,453536787               |
| TOPSIS                                 | 0,027942 | 0,016971          | 0,031629612 | 7621,228     | 43,941        | 471,476           | 864,353                      | 21,5                   | 0,698102080 | 0,450336324               |
| GRA                                    | 0,027945 | 0,016921          | 0,031251620 | 7507,856     | 43,116        | 475,131           | 863,911                      | 20,8                   | 0,698102080 | 0,449735312               |
| VIKOR                                  | 0,030110 | 0,017120          | 0,043438549 | 7745,892     | 43,595        | 430,691           | 868,507                      | 22,4                   | 0,698102080 | 0,459038162               |
| σ                                      | 0,001049 | 0,000140          | 0,005240673 | 84,209       | 0,381         | 18,550            | 2,000                        | 0,8                    | 0,000000000 | 0,003934189               |
| Aggressive Überschussreduzierungsmodus |          |                   |             |              |               |                   |                              |                        |             |                           |
| WSM                                    | 0,024930 | 0,015840          | 0,038173986 | 7537,053     | 45,538        | 477,819           | 864,459                      | 23,2                   | 0,689773407 | 0,451467541               |
| WPM                                    | 0,025913 | 0,016347          | 0,036312129 | 7496,047     | 45,080        | 475,352           | 868,665                      | 21,4                   | 0,703844690 | 0,459961565               |
| TOPSIS                                 | 0,024930 | 0,015840          | 0,038173986 | 7537,053     | 45,538        | 477,819           | 864,459                      | 23,2                   | 0,689773407 | 0,451467541               |
| GRA                                    | 0,025136 | 0,015927          | 0,038066242 | 7450,435     | 44,754        | 478,945           | 864,459                      | 22,2                   | 0,688347793 | 0,449937353               |
| VIKOR                                  | 0,027350 | 0,016679          | 0,042327560 | 7563,360     | 44,894        | 447,103           | 862,773                      | 22,6                   | 0,694095659 | 0,448190329               |
| σ                                      | 0,001031 | 0,000373          | 0,002223531 | 44,224       | 0,363         | 13,649            | 2,194                        | 0,7                    | 0,006346912 | 0,004541800               |
| Lastverteilungsmodus                   |          |                   |             |              |               |                   |                              |                        |             |                           |
| WSM                                    | 0,026433 | 0,016180          | 0,072484517 | 8294,452     | 48,757        | 461,677           | 867,080                      | 19,5                   | 0,746785194 | 0,461805287               |
| Kompromissmodus                        |          |                   |             |              |               |                   |                              |                        |             |                           |
| WSM                                    | 0,026537 | 0,016045          | 0,036626051 | 7476,577     | 45,604        | 483,742           | 860,846                      | 19,8                   | 0,690640867 | 0,476407089               |
| WPM                                    | 0,025056 | 0,016246          | 0,029984941 | 7756,530     | 45,074        | 441,759           | 866,922                      | 21,7                   | 0,708564903 | 0,442803333               |
| TOPSIS                                 | 0,028605 | 0,017358          | 0,032811711 | 7621,626     | 44,238        | 464,276           | 866,419                      | 22,3                   | 0,697603036 | 0,456324599               |
| GRA                                    | 0,023039 | 0,015033          | 0,035252936 | 7551,018     | 43,736        | 467,273           | 865,108                      | 21,6                   | 0,703799942 | 0,467718045               |
| VIKOR                                  | 0,029071 | 0,017688          | 0,043818449 | 7808,671     | 43,510        | 441,699           | 866,122                      | 19,9                   | 0,715441893 | 0,453649699               |
| σ                                      | 0,002504 | 0,001068          | 0,005195449 | 138,699      | 0,888         | 18,042            | 2,459                        | 1,1                    | 0,009592489 | 0,013003869               |

Tabelle 7.11: Durchschnittswerte der besten Kommunikationswege pro Modus und pro MCDM-Methode für die Metriken der Nutzer- und Netzwerkbetreiberperspektive für das Szenario *LowBR\_Mult\_STA*

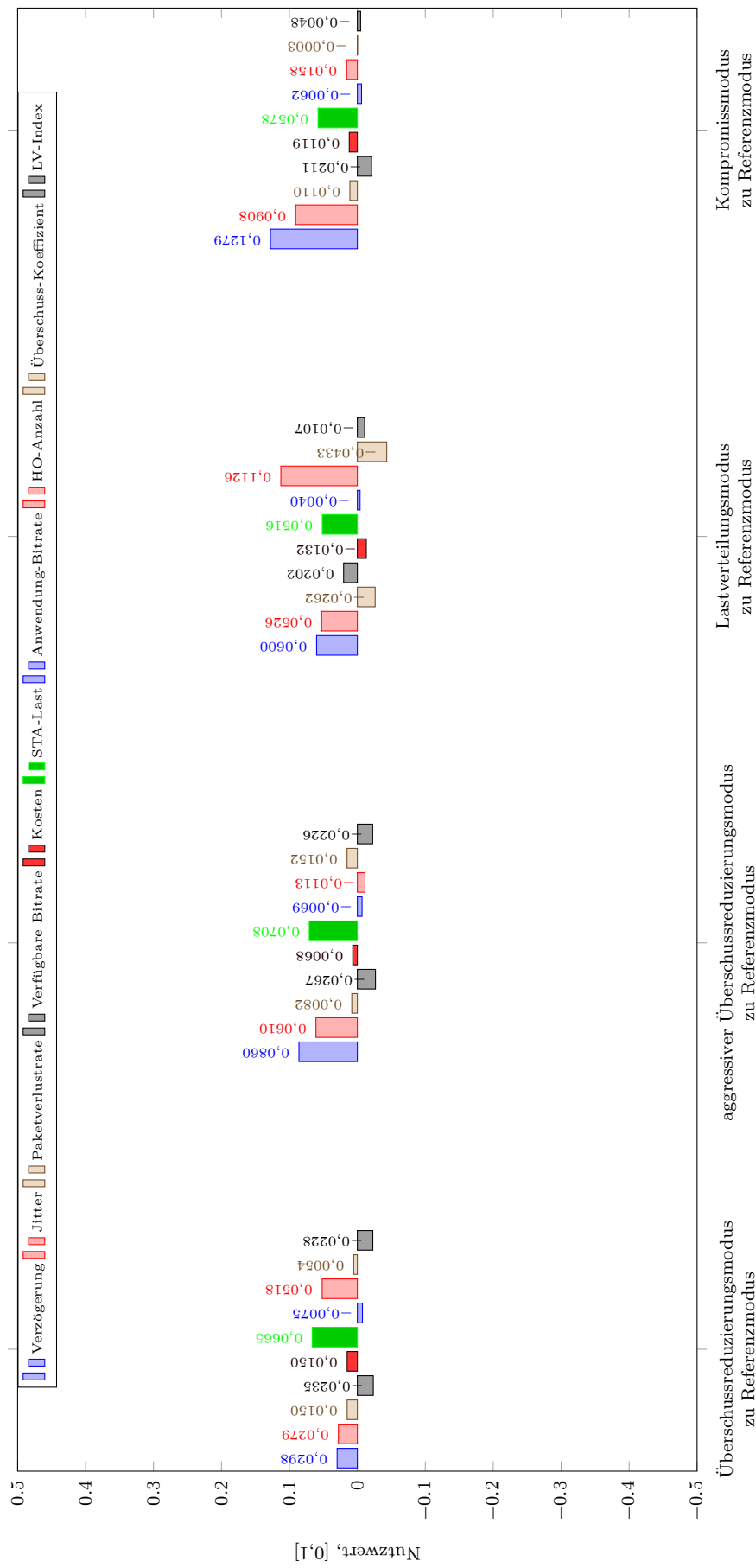


Abbildung 7.2: Änderungen der Nutzwerte der Metriken für das Szenario *LowBR\_Mult\_STA* von verschiedenen Modi relativ zu dem Referenzmodus

## 7.4 Simulationsergebnisse für das Szenario HighBR\_Mult\_STAs

In Tabelle 7.12 werden die während der Simulationen berechneten Durchschnittswerte der besten Kommunikationswege pro Modus und pro MCDM-Methode für die Metriken der Nutzer- und Netzbetreiberperspektive für das Szenario *HighBR\_Mult\_STA* dargestellt.

Die Werte der Metriken in diesem Szenario zeigen den gleichen Trend wie in den vorherigen zwei Szenarien. Allerdings ist bei diesem Szenario eine geringere Überschussreduzierung und eine geringere Kostenreduzierung zu verzeichnen. Außerdem ist der Überschusskoeffizient in allen Modi deutlich niedriger als bei den ersten zwei Szenarien. Das kann mit dem wesentlich höheren Anwendungsverkehr pro STA (bis zu 2100 kbit/s) erklärt werden. Höheres Aufkommen des Anwendungsverkehrs (im Vergleich zu vorherigen Szenarien) senkt potentiellen Überschuss der verfügbaren Bitrate und demzufolge potentiell Verbesserungspotential für das Kriterium Kosten.

Auch wie für die vorherigen zwei Szenarien werden für eine bessere Anschaulichkeit die Unterschiede der Nutzwerte von Metriken zwischen den Modi von 2 bis 5 relativ zu dem Referenzmodus beim Einsatz der MCDM-Methode GRA in Grafik 7.3 dargestellt.

| Modus/<br>MCDM-Meth.                          | Nutzerperspektive |             |              |               |                    | Netzwerkbetreiberperspektive |                        |           |                           |                    |
|---|-------------------|-------------|--------------|---------------|--------------------|------------------------------|------------------------|-----------|---------------------------|--------------------|
|   | Verz.<br>s        | Jitter<br>s | PV<br>[0, 1] | VBR<br>kbit/s | Kosten<br>C/MBByte | STA-Last<br>kbit/s           | Anw.-Bitrate<br>kbit/s | HO-Anzahl | Übersch.-Koeff.<br>[0, 1] | LV-Index<br>[0, 1] |
| <b>Referenzmodus</b>                          |                   |             |              |               |                    |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,034434          | 0,020344    | 0,049058200  | 7380,035      | 44,663             | 595,724                      | 1846,332               | 21,6      | 0,508057790               | 0,490336970        |
| WPM   | 0,032526          | 0,018825    | 0,029485779  | 7437,393      | 45,439             | 666,723                      | 1860,592               | 21,0      | 0,514994555               | 0,485817851        |
| TOPSIS  | 0,034434          | 0,020344    | 0,049058200  | 7380,035      | 44,663             | 595,724                      | 1846,332               | 21,6      | 0,508057790               | 0,490336970        |
| GRA   | 0,033130          | 0,020016    | 0,045571764  | 7480,416      | 45,016             | 628,542                      | 1841,675               | 20,0      | 0,510410509               | 0,482562480        |
| VIKOR   | 0,030684          | 0,018842    | 0,043915344  | 7318,439      | 47,146             | 635,636                      | 1871,266               | 23,8      | 0,502679751               | 0,510076343        |
| $\sigma$                                      | 0,001558          | 0,000779    | 0,008102724  | 61,870        | 1,034              | 29,308                       | 12,330                 | 1,4       | 0,004458627               | 0,0101717044       |
| <b>Überschussreduzierungsmodus</b>            |                   |             |              |               |                    |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,033707          | 0,019810    | 0,049380963  | 6977,627      | 44,472             | 652,995                      | 1832,104               | 23,5      | 0,488181305               | 0,465409338        |
| WPM   | 0,032034          | 0,019625    | 0,041366753  | 7296,358      | 43,070             | 673,316                      | 1866,819               | 20,2      | 0,505076334               | 0,477100742        |
| TOPSIS  | 0,033707          | 0,019810    | 0,049380963  | 6977,627      | 44,472             | 652,995                      | 1832,104               | 23,5      | 0,488181305               | 0,465409338        |
| GRA   | 0,033459          | 0,019590    | 0,042748762  | 7181,046      | 43,390             | 661,634                      | 1838,126               | 22,2      | 0,505443162               | 0,473073159        |
| VIKOR   | 0,029227          | 0,018144    | 0,042121497  | 7260,527      | 44,387             | 635,187                      | 1829,775               | 21,6      | 0,511746865               | 0,454502177        |
| $\sigma$                                      | 0,001919          | 0,000707    | 0,004029268  | 152,791       | 0,675              | 13,962                       | 15,425                 | 1,4       | 0,010867073               | 0,008661918        |
| <b>Aggressive Überschussreduzierungsmodus</b> |                   |             |              |               |                    |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,032394          | 0,019276    | 0,051124963  | 6823,264      | 44,064             | 647,945                      | 1818,721               | 21,7      | 0,470360572               | 0,476609042        |
| WPM   | 0,032900          | 0,019684    | 0,038814264  | 7263,161      | 44,318             | 674,577                      | 1839,430               | 19,6      | 0,501579711               | 0,486991749        |
| TOPSIS  | 0,032394          | 0,019276    | 0,051124963  | 6823,264      | 44,064             | 647,945                      | 1818,721               | 21,7      | 0,470360572               | 0,476609042        |
| GRA   | 0,032848          | 0,019420    | 0,049914780  | 6936,662      | 43,210             | 642,975                      | 1819,301               | 21,1      | 0,480434774               | 0,476747739        |
| VIKOR   | 0,033558          | 0,019450    | 0,047817121  | 6965,073      | 45,212             | 656,833                      | 1821,407               | 20,9      | 0,475212354               | 0,483474685        |
| $\sigma$                                      | 0,000478          | 0,000167    | 0,005179     | 180,169       | 0,716              | 12,512                       | 8,964                  | 0,9       | 0,012978728               | 0,004860427        |
| <b>Lastverteilungsmodus</b>                   |                   |             |              |               |                    |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,030670          | 0,019066    | 0,074481792  | 8097,007      | 47,609             | 670,816                      | 1844,619               | 18,6      | 0,560675543               | 0,505696494        |
| <b>Kompromissmodus</b>                        |                   |             |              |               |                    |                              |                        |           |                           |                    |
| WSM   | 0,033711          | 0,019526    | 0,031881457  | 7327,214      | 45,220             | 655,577                      | 1828,576               | 19,5      | 0,516275099               | 0,506434650        |
| WPM   | 0,032971          | 0,019649    | 0,037122999  | 7043,490      | 45,601             | 648,323                      | 1815,836               | 20,7      | 0,492570320               | 0,511866515        |
| TOPSIS  | 0,031168          | 0,019257    | 0,043586505  | 7078,637      | 44,314             | 640,881                      | 1819,054               | 23,3      | 0,493938688               | 0,469949437        |
| GRA   | 0,033159          | 0,019274    | 0,032602533  | 7172,995      | 45,351             | 653,359                      | 1844,158               | 21,0      | 0,503846352               | 0,501545162        |
| VIKOR   | 0,030335          | 0,018208    | 0,045974251  | 7388,841      | 45,553             | 654,499                      | 1840,823               | 21,6      | 0,519825117               | 0,463310956        |
| $\sigma$                                      | 0,001442          | 0,000569    | 0,006361276  | 151,470       | 0,522              | 6,066                        | 12,644                 | 1,4       | 0,012496686               | 0,022326737        |

Tabelle 7.12: Durchschnittswerte der besten Kommunikationswege pro Modus und pro MCDM-Methode für die Metriken der Nutzer- und Netzwerkbetreiberperspektive für Szenario *HighBR\_Mult\_STA*



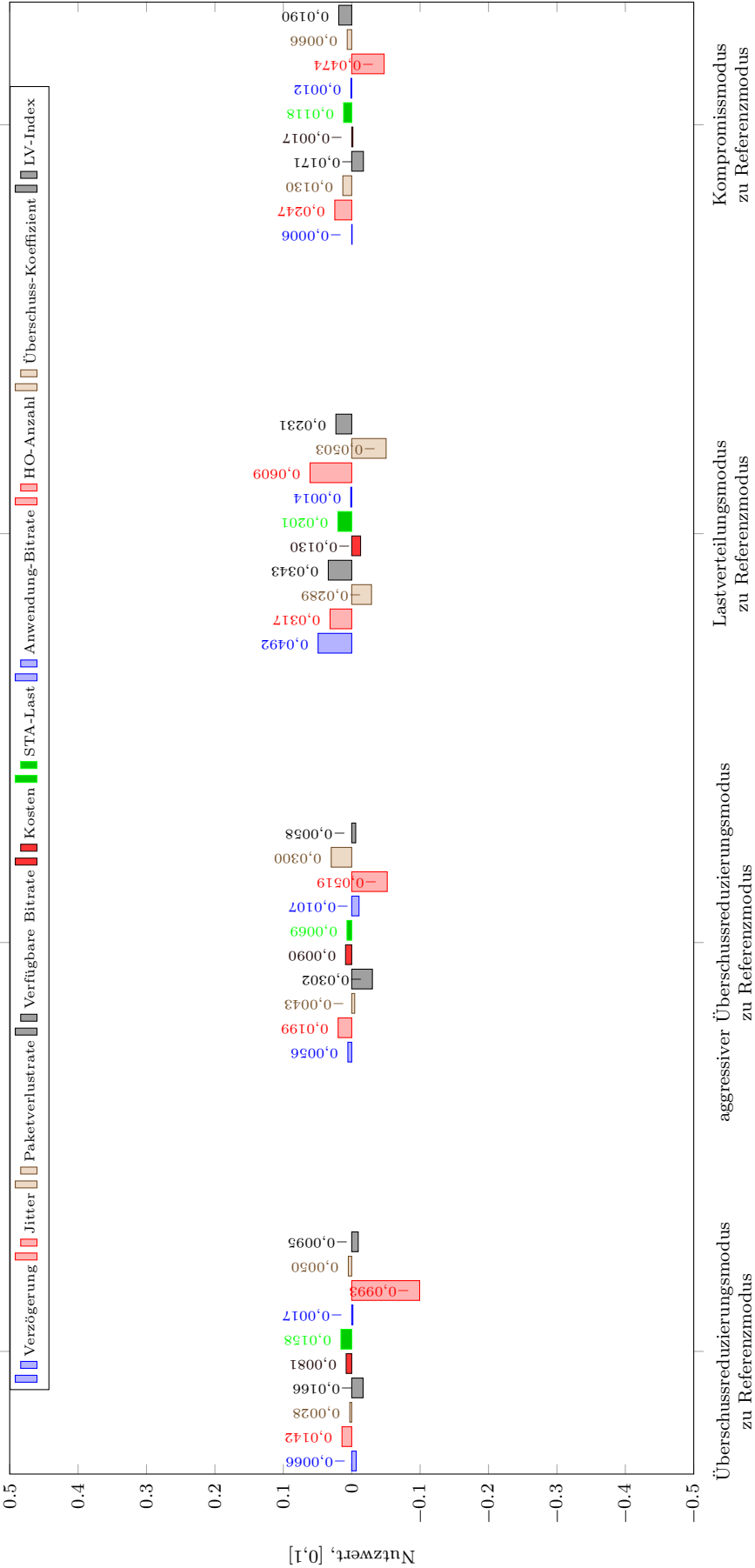


Abbildung 7.3: Änderungen der Nutzwerte der Metriken für das Szenario HighBR\_Mult\_STA von verschiedenen Modi relativ zu dem Referenzmodus

## 7.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Evaluierung des entwickelten FLASHED-Frameworks inklusive der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen ORA, AORA und LBA in der Simulationsumgebung OMNeT++ und der weiterentwickelten Bibliothek INET durchgeführt.

Für die Evaluierung wurden drei Szenarien mit unterschiedlicher Anzahl von STAs und den unterschiedlichen Volumen des Anwendungsverkehrs vorbereitet. Für jedes Szenario wurden fünf Simulationsmodi definiert. Dabei wurden ein Referenzmodus basierend auf dem traditionellen MCDM-Prozess und drei Modi auf Basis von jeweils einem vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmus (ORA, AORA und LBA) festgelegt. Beim fünften Modus kamen alle drei vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen gleichzeitig zum Einsatz. Für alle Modi bis auf den Lastverteilungsmodus wurden Submodi auf Basis von fünf MCDM-Methoden definiert. Jeder Submodus beinhaltete zehn Durchläufe mit unterschiedlichen Konfigurationen von APs hinsichtlich den maximal verfügbaren Bitraten und den Kosten.

Die tabellarisch und grafisch dargestellten Simulationsergebnisse zeigten die erwartete Auswirkung des FLASHED-Frameworks und der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen auf die Ergebnisse. Die Analyse der Ergebnisse konzentrierte sich auf die Metriken, die die am höchsten priorisierten Kriterien repräsentieren. Dabei ging es bei der Analyse der Auswirkung von ORA und AORA um die Metriken verfügbare Bitrate und Kosten und bei LBA um den Lastverteilungsindex. Alle drei Szenarien haben folgende Trends gezeigt. Die Verwendung von ORA und AORA führte zu zur Überschussreduzierung der verfügbaren Bitrate und zur Senkung der Kosten. Der Einsatz von LBA verbesserte den Lastverteilungsindex. Die gleichzeitige Verwendung von allen drei Algorithmen im Kompromissmodus führte bei meisten MCDM-Methoden zu einer schwachen Verbesserung von diesen drei Metriken.

Allerdings demonstrierten drei Szenarien unterschiedliche Ausprägungen von Überschussreduzierung der verfügbaren Bitrate und von Kostenreduzierung. Das erste Szenario mit nur einer STA und mit dem niedrigsten Volumen des Anwendungsverkehrs unter allen Szenarien lieferte die höchste Überschussreduzierung und Kostenreduzierung. Mit der Zunahme des Volumens des Anwendungsverkehrs im zweiten und im dritten Szenario sanken die Überschussreduzierung und Kostenreduzierung. Diese Entwicklung kann mit einem hohen Volumen des Anwendungsverkehrs erklärt werden. Mit dem Wachstum des Verkehrsaufkommens im Netzwerk, sinkt tendenziell der Überschuss der verfügbaren Bitrate. Somit verringert sich auch die mögliche Überschussreduzierung und dadurch auch das Potential für die Verbesserung von unbeschränkten Kriterien (in diesem Fall – Kosten).

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Anwendung der Konzepte und Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse, auch MCDM genannt, für das Problem der multikriteriellen Handoverentscheidung für mobile heterogene Kommunikationsnetze untersucht. Motiviert durch offene Themen aus dem Stand der Forschung wie mangelnde Flexibilität, schwache Anwendungssensitivität, nicht ausreichende Untersuchung der Optimierungspotentiale beim Handover und nicht ausreichender Vergleich der MCDM-Methoden wurden zwei neuartige Entscheidungsalgorithmen und ein Framework für die multikriterielle Handoverentscheidung ausgearbeitet.

Am Anfang vorliegender Arbeit in Kapitel 2 wurde MCDM vorgestellt, um eine Wissensgrundlage für die weiteren Kapiteln zu schaffen. MCDM strukturiert komplexe Entscheidungsprobleme, indem die Probleme in einzelne Schritte heruntergebrochen werden. Zusätzlich werden MCDM-Komponententypen wie Ziele, Kriterien und Alternativen definiert, die in einer hierarchischen Struktur eingeordnet werden. In diesem Kapitel werden die MCDM-Schritte für bessere Anschaulichkeit anhand einer beispielhaften Wegewahlentscheidung für den multikriteriellen Handover erklärt. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit Entscheidungskriterien und mit damit zusammenhängenden MCDM-Prozessschritten wie Priorisierung und Normierung. Im letzten Abschnitt wurde ein Überblick über die MCDM-Methoden WSM, WPM, TOPSIS, GRA, VIKOR und ELECTRE gegeben, die am häufigsten für die Wegewahlentscheidung im Rahmen des multikriteriellen Handovers eingesetzt werden.

Nach der Beschreibung des MCDM geht es in Kapitel 3 zum Problem der multikriteriellen Handoverentscheidung über. Hier wurde die Motivation für die Nutzung der multikriteriellen Handoverentscheidungsmethoden statt traditionellen RSS-basierten Techniken und der Stand der Forschung zu diesem Thema vorgestellt. Als Treiber für die multikriterielle Handoverentscheidung gelten die Konvergenz der mobilen Netze und wachsende Vielfalt der mobilen multimedialen Anwendungen mit ihren Anforderungen an die Netzwerkcharakteristiken verschiedener Art wie zum Beispiel QoS und Sicherheit. Darüber hinaus können die Nutzerpräferenzen und Endgeräteeigenschaften durch die multikriterielle Handoverentscheidung berücksichtigt werden. Die durchgeführte Untersuchung diversen Studien hat folgende für eine Untersuchung offene Themen aufgedeckt, die in Kapiteln 4 und 5 adressiert werden:

- eine Datenstruktur für eine umfangreiche und flexible Konfiguration der Handoverentscheidung,
- schwache Anwendungssensitivität – beschränkte Möglichkeiten für die Parametrierung von für Handoverentscheidung relevanten anwendungsspezifischen Informationssätze, auch für mehrere aktive Anwendungen,
- fehlende Untersuchung der Optimierungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Anwendungsanforderungen,
- nicht ausreichender Vergleich der Anwendung unterschiedlicher MCDM-Methoden.

In Kapitel 4 erfolgte eine Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten beim multikriteriellen Handover. Dabei wurde der Fokus auf die Reduzierung des Überschusses bei bestimmten Kriterien abhängig von Anwendungsanforderungen gelegt. Dafür wurde für die Nutzenfunktionen der Kriterien zusätzlich zu dem Optimierungsbereich ein gesättigter Bereich definiert. Im gesättigten Bereich der Nutzenfunktion eines Kriteriums ist keine Verbesserung des Nutzwertes möglich. Die gesättigten Bereiche werden pro Kriterium in Abhängigkeit von Anwendungsanforderungen definiert. Die Kriterien mit Nutzenfunktionen mit gesättigten Bereichen werden als beschränkte Kriterien bezeichnet. Die Kriterien mit Nutzenfunktion ohne gesättigten Bereich zählen zu unbeschränkten Kriterien. Es wurden zwei Entscheidungsalgorithmen ausgearbeitet. Dem ersten Algorithmus namens ORA liegt eine Anpassung der Nutzenfunktion der beschränkten Kriterien an die Anwendungsanforderungen zugrunde. Das führt zu einer Verbesserung der Werte von beschränkten Kriterien nur bis zu einer bestimmten Grenze, wodurch die Werte der unbeschränkten Kriterien verbessert werden können. Der zweite Algorithmus namens AORA setzt auf ORA auf und bezweckt eine zu ORA zusätzliche Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien auf Kosten von unbeschränkten Kriterien. Ein Teil von AORA ist ein Mechanismus zur Kontrolle des Verhältnisses zwischen der Überschussreduzierung bei beschränkten Kriterien und der Degradierung bei unbeschränkten Kriterien. ORA und AORA wurden mittels numerischer Simulationen evaluiert.

In Kapitel 5 wurde das FLASHED-Framework vorgestellt. Das FLASHED-Framework ist die Implementierung einer flexiblen und umfangreichen multikriteriellen Handoverentscheidungsphase. Das FLASHED-Framework wurde von MCDM inspiriert und beinhaltet die MCDM-Komponententypen mit ein paar zusätzlichen Komponententypen, die in einer baumartigen Struktur eingeordnet wurden. Diese Struktur wurde als eine Datenbank implementiert. Die implementierte Datenbank ermöglicht

eine anwendungsabhängige Konfiguration der Komponententypen Ziele und Kriterien. Außerdem enthält das FLASHED-Framework drei Algorithmen für die Bewertung der Kommunikationswege. Zwei davon sind ORA und AORA. Der dritte Algorithmus ist der lastverteilungsorientierte Algorithmus namens LBA. ORA repräsentiert die Perspektive des Nutzers, und AORA und LBA repräsentieren die Perspektive und Ziele des Netzbetreibers. Zusammengefasst ermöglicht das FLASHED-Framework eine flexible und umfangreiche Konfiguration der Handoverentscheidung durch das Definieren und das Parametrieren der Komponenten Perspektiven, Ziele, Kriterien, Anwendung und Anwendungstypen. Basierend auf den konfigurierten Komponenten aus der Datenbank werden vom FLASHED-Framework die Handoverentscheidungen getroffen.

Für die Evaluierung des FLASHED-Frameworks inklusive ORA und AORA wurde sich für die Simulationsumgebung OMNeT++/INET entschieden. OMNeT++/INET wurde mit für die Simulation des multikriteriellen Handovers fehlenden Funktionalitäten erweitert. Zuerst wurde für die Realisierung eines proaktiven Handovers ein regelmäßiger passiver Scan entwickelt. Als Nächstes wurde die Sammlung der Werte der Kriterien Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate, Kosten und verfügbare und maximale Bitrate des APs implementiert. Außerdem wurde das INET-Modul *UDPBasicApp* mit der Adaptivität der generierten Datenrate für die Modellierung der Anwendungen mit dynamischer Bitrate nachgerüstet. Eine weitere durchgeführte Implementierung ermöglicht eine Kopplung von OMNeT++/INET an das FLASHED-Framework. Darüber hinaus wurde INET mit eine Reihe neuer für die Bewertung der Handoverentscheidungsergebnisse relevanten Statistiken erweitert. Somit wurde ein Werkzeug für die Simulation des multikriteriellen Handovers geschaffen und in Kapitel 6 vorgestellt.

Kapitel 7 beschreibt die Evaluierung des FLASHED-Frameworks inklusive der vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmen ORA und AORA. Für die Evaluierung wurde eine WLAN-Infrastruktur in der erweiterten und in Kapitel 6 beschriebenen Version OMNeT++/INET simuliert. Drei Simulationsszenarien wurden definiert, die sich in der Anzahl der STAs und in dem Volumen des Anwendungsverkehrs unterscheiden. Für alle Szenarien wurden die Kriterien Verzögerung, Jitter, Paketverlustrate, verfügbare Bitrate und Kosten verwendet. Dabei wurden anwendungsabhängige gesättigten Bereiche für verfügbare Bitrate konfiguriert. Für jedes Szenario wurden fünf Modi vorbereitet. Im ersten Modus kam ein traditioneller MCDM-basierter Handover-Entscheidungsalgorithmus zum Einsatz, der als Referenzmodus diente. Die weiteren drei Modi nutzten jeweils die Algorithmen ORA, AORA und LBA. Im vierten Modus kamen diese drei Algorithmen gleichzeitig zum Einsatz. Für jeden Modus bis auf den LBA-basierten Modus wurden fünf Submodi definiert, in denen für ORA die MCDM-Methoden WSM, WPM, TOPSIS, GRA und VIKOR benutzt wurden.

Anschließend wurden für jeden Submodus und für den LBA-Modus zehn Durchläufe mit unterschiedlichen Kosten und maximalen Bitraten der APs konfiguriert. Die Simulationsergebnisse zeigten folgende erwartete Ergebnisse. Im Vergleich zum Referenzmodus haben die ORA- und AORA-Modi eine Überschussreduzierung für die verfügbare Bitrate und eine Senkung der Kosten gezeigt. Der LBA-Modus hat zu einer Verbesserung der Lastverteilungsindex geführt. Der gleichzeitige Einsatz von ORA, AORA und LBA hatte in meisten Durchläufen zur Folge eine leichte Überschussreduzierung der verfügbaren Bitrate und eine leichte Senkung der Kosten und des Lastverteilungsindex. Zu guter Letzt wurden beim Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher MCDM-Methoden keine wesentlichen Unterschiede festgestellt.

Abschließend wird ein Ausblick in Kapitel 9 vorgestellt, in dem die nachfolgenden Forschungsrichtungen beschrieben werden.

Zusammengefasst bringt das FLASHED-Framework als Ergebnis vorliegender Arbeit folgende neuartige Eigenschaften für die Handoverentscheidungsphase:

- Flexibilität der Konfiguration der Handoverentscheidung – Die Möglichkeit der Konfiguration und Parametrierung der für Handoverentscheidung relevanten Komponenten wie Perspektiven, Ziele, Kriterien, Anwendungen, Anwendungstypen wurde in einer Datenbank in einer hierarchischen und strukturierten Form realisiert.
- Anwendungssensitivität – Die Möglichkeit einer anwendungsspezifischen Konfiguration der Ziele und der Kriterien wurde mit Hilfe einer Datenbank und des Algorithmus aus Abschnitt 5.2.6 implementiert. Im Falle von mehreren aktiven Anwendungen werden die Parameterwerte der anwendungsspezifischen Konfigurationen der Ziele und der Kriterien nach bestimmten Regeln (siehe Tabelle 5.5 aus Abschnitt 5.2.6) zusammengefasst.
- Neuartige Entscheidungsalgorithmen – Überschussreduzierung wurde als Potential zur Verbesserung der Kriterienwerte untersucht. Die Algorithmen ORA und AORA wurden ausgearbeitet und implementiert.
- Untersuchung des Einsatzes der MCDM-Methoden WSM, WPM, TOPSIS, GRA und VIKOR wurde im Rahmen der numerischen Untersuchungen und Simulationen mit Hilfe von OMNeT++/INET durchgeführt. Es wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen den mit unterschiedlichen MCDM-Methoden berechneten Ergebnissen festgestellt.
- Weiterentwicklung von OMNeT++/INET wurde mit den Funktionalitäten für einen multikriteriellen Handover erweitert. Diese Version von OMNeT++/INET kann als Plattform für weitere Forschungsarbeiten genutzt werden.

## 9 Ausblick

Die während der Erstellung dieser Arbeit durchgeführte Recherche über den Stand der Forschung bezüglich MCDM-basierten Handoverentscheidungsmethoden, die entwickelten Konzepte und die durchgeführten Implementierungen haben einige offene Fragen aufgeworfen, die im Rahmen weiterer Forschungen verfolgt werden können. Diese offene Fragen werden im Folgenden vorgestellt.

Das Thema der Identifikation und Konfiguration von relevanten Kriterien pro Szenario ist für weitere Untersuchungen offen. Ein Szenario kann sich dabei aus verschiedenen Informationen wie zum Beispiel Anwendungstyp und Mobilitätsmuster zusammensetzen. Unter der Konfiguration wird hier Priorisierung der Kriterien und Definition der gesättigten Bereiche für ORA und AORA pro Kriterium und pro Anwendungstyp gemeint. Darüber hinaus lässt sich eine szenarienabhängige Priorisierung der Perspektiven und der Ziele im FLASHED-Framework als Gegenstand weiterer Untersuchungen betrachten.

Ein weiteres Thema für nachfolgende Forschungen besteht im Vergleich der MCDM-basierten Handoverentscheidungsmethoden mit den Handoverentscheidungsmethoden auf Basis anderer Techniken wie künstliche neuronale Netze, Fuzzy-Logik, Spieltheorie und genetische Algorithmen. Dabei ist es sinnvoll, bei den Untersuchungen mehrere Szenarien zu betrachten, um unterschiedliche Techniken auf ihre szenarienspezifische Eignung zu überprüfen.

Des Weiteren wäre die Bestimmung eines optimalen *minOptToDegRatio*-Wertes für AORA ein Thema für die zukünftige Untersuchungen. Hierbei sollte auf die Streuung der Messwerte verschiedener Entscheidungskriterien besonderer Fokus gelegt werden.

Eine weitere Richtung für nachfolgende Forschung ist die Untersuchung der Anwendbarkeit des FLASHED-Frameworks inklusive ORA und AORA für das relativ neue Forschungsgebiet *Device-to-Device* (D2D) in *LTE-Advanced* (LTE-A). Laut Übersichtsstudie in [AsWM14] ist die multikriterielle Optimierung unter Berücksichtigung von Anwendungseigenschaften und -anforderungen ein aktuelles Forschungsthema in D2D in LTE-A.





## Anhang



## A Gesamtnutzwerte berechnet mit unterschiedlichen MCDM-Methoden

In den Tabellen unten sind die Gesamtnutzwerte eines simulierten Kommunikationsweges vorgestellt, die nach den Szenarien aus Tabellen 5.3 und 5.4 aus Abschnitt 5.2.5 mit unterschiedlichen MCDM-Methoden berechnet wurden.

| Durchläufe | WSM    | WPM    | TOPSIS | VIKOR  | GRA    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1          | 0,9500 | 0,9500 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2          | 0,8500 | 0,8500 | 0,8989 | 0,5270 | 0,9167 |
| 3          | 0,8000 | 0,8000 | 0,8466 | 0,5228 | 0,8812 |
| 4          | 0,7500 | 0,7500 | 0,7876 | 0,4985 | 0,7894 |
| 5          | 0,7000 | 0,7000 | 0,7199 | 0,4708 | 0,7078 |
| 6          | 0,6500 | 0,6500 | 0,6500 | 0,4432 | 0,6417 |
| 7          | 0,6000 | 0,6000 | 0,5804 | 0,4155 | 0,5870 |
| 8          | 0,5500 | 0,5500 | 0,5121 | 0,3934 | 0,5410 |
| 9          | 0,5000 | 0,5000 | 0,4455 | 0,3783 | 0,5018 |
| 10         | 0,4500 | 0,4500 | 0,3809 | 0,3632 | 0,4679 |
| 11         | 0,4000 | 0,4000 | 0,3184 | 0,3482 | 0,4383 |
| 12         | 0,3500 | 0,3500 | 0,2581 | 0,3331 | 0,4123 |
| 13         | 0,3000 | 0,3000 | 0,2002 | 0,3180 | 0,3892 |
| 14         | 0,2500 | 0,2500 | 0,1454 | 0,3029 | 0,3686 |
| 15         | 0,2000 | 0,2000 | 0,0953 | 0,2878 | 0,3659 |
| 16         | 0,1500 | 0,1500 | 0,0507 | 0,2781 | 0,3635 |
| 17         | 0,1000 | 0,1000 | 0,0083 | 0,2686 | 0,3615 |
| 18         | 0,0500 | 0,0500 | 0,0000 | 0,2667 | 0,3597 |
| 19         | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2667 | 0,3582 |

Tabelle A.1: Gesamtnutzwerte für den simulierten Kommunikationsweg berechnet mit verschiedenen MCDM-Methoden für das Szenario I nach Tabelle 5.3 aus Abschnitt 5.2.5

| Durchläufe | WSM    | WPM    | TOPSIS | VIKOR  | GRA    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1          | 0.9499 | 0.9500 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 2          | 0.8499 | 0.8500 | 0.4862 | 0.1559 | 0.7840 |
| 3          | 0.7999 | 0.8000 | 0.3707 | 0.1559 | 0.7840 |
| 4          | 0.7499 | 0.7500 | 0.2911 | 0.1536 | 0.7697 |
| 5          | 0.6999 | 0.7000 | 0.2327 | 0.1507 | 0.7592 |
| 6          | 0.6499 | 0.6500 | 0.1882 | 0.1478 | 0.7525 |
| 7          | 0.5999 | 0.6000 | 0.1531 | 0.1449 | 0.7479 |
| 8          | 0.5499 | 0.5500 | 0.1248 | 0.1421 | 0.7445 |
| 9          | 0.5000 | 0.5000 | 0.1015 | 0.1392 | 0.7419 |
| 10         | 0.4500 | 0.4500 | 0.0819 | 0.1363 | 0.7398 |
| 11         | 0.4000 | 0.4000 | 0.0652 | 0.1334 | 0.7382 |
| 12         | 0.3500 | 0.3500 | 0.0509 | 0.1306 | 0.7368 |
| 13         | 0.3000 | 0.3000 | 0.0384 | 0.1277 | 0.7356 |
| 14         | 0.2500 | 0.2500 | 0.0274 | 0.1248 | 0.7347 |
| 15         | 0.2000 | 0.2000 | 0.0178 | 0.1219 | 0.7338 |
| 16         | 0.1500 | 0.1500 | 0.0092 | 0.1193 | 0.7331 |
| 17         | 0.1000 | 0.1000 | 0.0014 | 0.1167 | 0.7324 |
| 18         | 0.0500 | 0.0500 | 0.0000 | 0.1162 | 0.7318 |
| 19         | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1162 | 0.7313 |

Tabelle A.2: Gesamtnutzwerte für den simulierten Kommunikationsweg berechnet mit verschiedenen MCDM-Methoden für das Szenario II nach Tabelle 5.3 aus Abschnitt 5.2.5

| Durchläufe | WSM    | WPM    | TOPSIS | VIKOR  | GRA    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1          | 0.9500 | 0.9500 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 2          | 0.8500 | 0.8500 | 0.8261 | 0.4000 | 0.8542 |
| 3          | 0.8000 | 0.8000 | 0.7468 | 0.4000 | 0.7921 |
| 4          | 0.7500 | 0.7500 | 0.6699 | 0.3935 | 0.7129 |
| 5          | 0.7000 | 0.7000 | 0.5945 | 0.3860 | 0.6455 |
| 6          | 0.6500 | 0.6500 | 0.5231 | 0.3784 | 0.5901 |
| 7          | 0.6000 | 0.6000 | 0.4562 | 0.3709 | 0.5435 |
| 8          | 0.5500 | 0.5500 | 0.3938 | 0.3634 | 0.5038 |
| 9          | 0.5000 | 0.5000 | 0.3356 | 0.3558 | 0.4696 |
| 10         | 0.4500 | 0.4500 | 0.2815 | 0.3483 | 0.4398 |
| 11         | 0.4000 | 0.4000 | 0.2311 | 0.3407 | 0.4136 |
| 12         | 0.3500 | 0.3500 | 0.1841 | 0.3332 | 0.3904 |
| 13         | 0.3000 | 0.3000 | 0.1406 | 0.3257 | 0.3696 |
| 14         | 0.2500 | 0.2500 | 0.1005 | 0.3181 | 0.3510 |
| 15         | 0.2000 | 0.2000 | 0.0651 | 0.3106 | 0.3496 |
| 16         | 0.1500 | 0.1500 | 0.0343 | 0.3057 | 0.3484 |
| 17         | 0.1000 | 0.1000 | 0.0055 | 0.3010 | 0.3474 |
| 18         | 0.0500 | 0.0500 | 0.0000 | 0.3000 | 0.3465 |
| 19         | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.3000 | 0.3457 |

Tabelle A.3: Gesamtnutzwerte für den simulierten Kommunikationsweg berechnet mit verschiedenen MCDM-Methoden für das Szenario III nach Tabelle 5.4 aus Abschnitt 5.2.5

| Durchläufe | WSM    | WPM    | TOPSIS | VIKOR  | GRA    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1          | 0.9503 | 0.9500 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 2          | 0.8503 | 0.8500 | 0.3196 | 0.2392 | 0.7210 |
| 3          | 0.8002 | 0.7999 | 0.2262 | 0.2392 | 0.7210 |
| 4          | 0.7502 | 0.7499 | 0.1691 | 0.2382 | 0.7152 |
| 5          | 0.7002 | 0.6999 | 0.1306 | 0.2371 | 0.7110 |
| 6          | 0.6502 | 0.6499 | 0.1029 | 0.2360 | 0.7083 |
| 7          | 0.6002 | 0.5999 | 0.0820 | 0.2348 | 0.7063 |
| 8          | 0.5502 | 0.5499 | 0.0657 | 0.2337 | 0.7049 |
| 9          | 0.5002 | 0.4999 | 0.0526 | 0.2325 | 0.7038 |
| 10         | 0.4501 | 0.4499 | 0.0419 | 0.2314 | 0.7030 |
| 11         | 0.4001 | 0.3999 | 0.0330 | 0.2302 | 0.7022 |
| 12         | 0.3501 | 0.3499 | 0.0254 | 0.2291 | 0.7017 |
| 13         | 0.3001 | 0.2999 | 0.0189 | 0.2279 | 0.7012 |
| 14         | 0.2501 | 0.2499 | 0.0133 | 0.2268 | 0.7007 |
| 15         | 0.2001 | 0.1999 | 0.0085 | 0.2257 | 0.7004 |
| 16         | 0.1500 | 0.1499 | 0.0044 | 0.2248 | 0.7001 |
| 17         | 0.1000 | 0.0999 | 0.0007 | 0.2239 | 0.6998 |
| 18         | 0.0500 | 0.0500 | 0.0000 | 0.2237 | 0.6995 |
| 19         | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2237 | 0.6993 |

Tabelle A.4: Gesamtnutzwerte für den simulierten Kommunikationsweg berechnet mit verschiedenen MCDM-Methoden für das Szenario IV nach Tabelle 5.4 aus Abschnitt 5.2.5



## B MCDM-Methoden

Dieses Kapitel beschreibt ausführlich die gängigsten MCDM-Methoden der MADM-Gruppe wie WSM, WPM, GRA, VIKOR und TOPSIS. Bei der Beschreibung der Methoden werden die Notationen aus Tabelle 2.3 aus Kapitel 2.1 benutzt.

### B.1 WSM

*Weighted Sum Method* (WSM) oder *Simple Additive Weighting* (SAW) ist eine relativ einfache und sehr populäre MCDM-Methode, die im Jahr 1967 von P.C. Fishburn in [Fish67] formuliert wurde. Die Bewertung der Alternativen bei WSM erfolgt durch das Berechnen einer gewichteten Summe aller Kriterienwerte für jede Alternative nach Formel (B.1). Dabei gewinnt die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert.

$$S_{\text{WSM}} = \max_i \sum_{j=1}^N w_j x_{ij}, \quad i \in I \quad (\text{B.1})$$

Die WSM-Methode beinhaltet keine Normierungsphase, deswegen muss die Normierung der Kriterienwerte vor der Alternativenbewertung stattfinden, wenn die Kriterien mit unterschiedlichen Wertebereichen vorliegen. Die Normierungsphase kann in WSM integriert werden, indem man statt des Kriterienwertes  $x_{ij}$  die Nutzenfunktion  $f_j(x_{ij})$  verwendet:

$$S_{\text{WSM}} = \max_i \sum_{j=1}^N w_j f_j(x_{ij}), \quad i \in I \quad (\text{B.2})$$

### B.2 WPM

*Weighted Produkt Model* (WPM) oder auch *Multiplicative Exponential Weighting* (MEW) genannt, wurde zuerst in [Brid22] und [MiSt69] erwähnt. Bei der WPM-Methode werden die Kriterienwerte jeder Alternative zuerst durch ihre Kriteriengewichte potenziert und dann die potenzierten Werte miteinander multipliziert.

Die Bestimmung der besten Alternative für die Wertekriterien erfolgt nach der Formel:

$$S_{\text{WPM}} = \max_i \prod_{j=1}^N x_{ij}^{w_j}, \quad i \in I. \quad (\text{B.3})$$

Die WPM-Methode wird auch als dimensionslose Methode bezeichnet, da durch die zugrunde liegenden mathematischen Operationen die Kriteriendimensionen eliminiert werden. Damit ist mit WPM eine Alternativenbewertung anhand von Kriterien mit unterschiedlichen Wertebereichen ohne Normierung möglich.

## B.3 TOPSIS

Die TOPSIS-Methode (engl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) wurde im Jahr 1981 von Hwang und Yoon [HwYo81] entwickelt. Die Grundidee von TOPSIS besteht in Bewertung der Alternativen durch die Berechnung der Abstände zur idealen und zur anti-idealen Lösungen für jede Alternative.

Die TOPSIS-Methode besteht aus folgenden sechs Schritten:

### 1. Kalkulation einer normierten Entscheidungsmatrix

In [HwYo81] wird Vektornormierung nach Formel (B.4) vorgeschlagen. Dabei geht es um die Normierung für die Wertekriterien  $J^+$ . Für die Kostenkriterien wird keine Normierungstechnik vorgeschlagen. Nach der Einschätzung des Autors der vorliegenden Arbeit kann die Normierung der Kostenkriterien  $J^-$  nach Formel (B.5) erfolgen.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M x_{ij}^2}}, \quad i \in I, j \in J^+ \quad (\text{B.4})$$

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M x_{ij}^2}}, \quad i \in I, j \in J^- \quad (\text{B.5})$$

2. Kalkulation einer gewichteten normierten Entscheidungsmatrix  $V$  nach Formel (B.6)

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad i \in I, j \in J \quad (\text{B.6})$$



Gewichtete normierte Entscheidungsmatrix:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2N} \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ v_{M1} & v_{M2} & v_{M3} & \dots & v_{MN} \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

3. Kalkulation idealer Lösung  $A^*$  und anti-idealer Lösung  $A^-$ :

$$A^* = \{(\max v_{ij} | j \in J) | i \in I\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_N^*\} \quad , \quad (\text{B.8})$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} | j \in J) | i \in I\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_N^-\} \quad . \quad (\text{B.9})$$

4. Kalkulation der Abstände zur idealen und zur anti-idealen Lösung für jede Alternative mittels des euklidischen Abstandes:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^*)^2}, \quad i \in I \quad , \quad (\text{B.10})$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i \in I \quad . \quad (\text{B.11})$$

5. Kalkulation der relativen Nähe zur anti-idealen Lösung für jede Alternative

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, \quad i \in I \quad (\text{B.12})$$

6. Aufstellung einer Rangliste der Alternativen basierend auf der kalkulierten relativen Nähe

Die Alternative mit dem höchsten Wert  $C$  gilt als die beste Alternative.

## B.4 GRA

*Grey Relational Analysis* (GRA) wurde von Deng Julong im Jahre 1980 vorgeschlagen. Die GRA beschäftigt sich mit Systemen mit ungenauen und unvollständigen Eingangsdaten, die als „grau“ bezeichnet werden. Das mathematische Modell von GRA wird auch für multikriterielle Entscheidungen benutzt. Eine Einführung in GRA ist in [LiFY11] gegeben. Die Alternativenbewertung geschieht mit Hilfe des *Gray Relational*

*Grade* (GRG), der seinerseits aus den *Grey Relational Coefficients* (GRC) jedes Kriteriums einer Alternative berechnet wird. Die einzelnen Schritte der GRA-Methode sind unten aufgeführt.

1. *Konstruktion der normierten Entscheidungsmatrix*

Die Normierung erfolgt für die Wertekriterien  $J^+$  nach (B.13) und für die Kostenkriterien  $J^-$  nach (B.14).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{i \in I} x_{ij}}{\max_{i \in I} x_{ij} - \min_{i \in I} x_{ij}}, \quad i \in I, j \in J^+ \quad (\text{B.13})$$

$$r_{ij} = \frac{\max_{i \in I} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{i \in I} x_{ij} - \min_{i \in I} x_{ij}}, \quad i \in I, j \in J^- \quad (\text{B.14})$$

2. *Konstruktion der gewichteten normierten Entscheidungsmatrix*

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad i \in I, j \in J \quad (\text{B.15})$$

3. *Kalkulation der idealen Lösung*

$$A^* = \{(\max_{j \in J} v_{ij} | j \in J) | i \in I\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_N^*\} \quad (\text{B.16})$$

4. *Kalkulation von GRC*

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta \min + \zeta \Delta \max}{\Delta_{*ij} + \zeta \Delta \max} \quad (\text{B.17})$$

Dabei gilt Folgendes:

- $\Delta_{*ij} = |v_j^* - v_{ij}|$  ist die Abweichung eines normierten und gewichteten Kriterienwertes  $j$  einer Alternative  $i$  vom Kriteriumwert der idealen Lösung  $A^*$ ,
- $\Delta \min = \min_{j \in J} \min_{i \in I} |v_j^* - v_{ij}|$  ist das Minimum von allen minimalen Abweichungen der normierten und gewichteten Kriterienwerte jeder Alternative von Kriterienwerten der idealen Lösung  $A^*$ ,
- $\Delta \max = \max_{j \in J} \max_{i \in I} |v_j^* - v_{ij}|$  ist das Maximum von allen maximalen Abweichungen der normierten und gewichteten Kriterienwerte jeder Alternative von Kriterienwerten der idealen Lösung  $A^*$ ,
- $\zeta \in [0, 1]$  ist der Identifikationskoeffizient, der üblicherweise auf 0,5 gesetzt wird.

5. *Kalkulation von GRG*

$$\gamma_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \xi_{ij}, \quad i \in I, j \in J \quad (\text{B.18})$$

Die Alternative mit dem höchsten GRG ist die beste Lösung im Sinne von GRA.

## B.5 VIKOR

Die VIKOR-Methode wurde im Jahr 1979 von S. Opricovic veröffentlicht und ist in [OpTz07] vorgestellt. VIKOR ist ein Akronym aus dem Serbischen „*VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*“, was wie „Optimierung und Kompromisslösung“ ins Deutsche übersetzt wird. Für die Alternativenbewertung werden nach VIKOR für jede Alternative die Abstände zur idealen Lösung und zur anti-idealen Lösung jeweils mittels gewichteter und normierter Manhattan-Distanz und gewichteter und normierter Chebyshev-Distanz berechnet. Im Gegensatz zu den anderen in der vorliegenden Arbeit behandelten MCDM-Methoden arbeitet VIKOR nicht mit Kriterienwerten, sondern mit Nutzenfunktionen.

Die VIKOR-Methode besteht aus folgenden Schritten:

1. *Bestimmung der idealen Lösung  $A^*$  und der anti-idealen Lösungen  $A^-$  für die Nutzenfunktionen  $f(x)$  aller Kriterien*

$$A^* = \{(\max f_{ij} | j \in J) | i \in I\} = \{f_1^*, f_2^*, \dots, f_N^*\} \quad (\text{B.19})$$

$$A^- = \{(\min f_{ij} | j \in N) | i \in M\} = \{f_1^-, f_2^-, \dots, f_N^-\} \quad (\text{B.20})$$

2. *Kalkulation von gewichteter und normierter Manhattan-Distanz  $S_i$  und gewichteter und normierter Chebyshev-Distanz  $R_i$  für jede Alternative*

$$S_i = \sum_{j=1}^N \frac{w_i(f_j^* - f_{ij})}{f_j^* - f_j^-}, \quad i \in I \quad (\text{B.21})$$

$$R_i = \max_{j \in J} \left[ \frac{w_i(f_j^* - f_{ij})}{f_j^* - f_j^-} \right], \quad i \in I \quad (\text{B.22})$$

3. *Kalkulation der  $Q_i$ -Werte*

$$Q_i = \frac{v(S_i - S^*)}{S^- - S^*} + \frac{(1-v)(R_i - R^*)}{R^- - R^*}, \quad i \in I \quad (\text{B.23})$$

Dabei gilt Folgendes:

- $v$  ist der Index für die Priorisierung der Manhattan- und Chebyshev-Strategie, der vom Entscheidungsfäller gesetzt wird. Wenn die Strategien gleich gewichtet werden sollen, wird  $v$  auf 0,5 gesetzt.

- $S^* = \min_{i \in I} S_i$
- $S^- = \max_{i \in I} S_i$
- $R^* = \min_{i \in I} R_i$
- $R^- = \max_{i \in I} R_i$

4. Erstellen von drei Ranglisten für die Alternativen, basierend auf den Werten von  $S$ ,  $R$  und  $Q$ . Dabei gilt es alle drei Werte zu minimieren.

5. Bestimmung der besten Lösung

Dabei wird  $A'$  mit dem minimalsten  $Q$ -Wert als beste Alternative bewertet, wenn folgende zwei Bedingungen erfüllt werden:

**B1** „Akzeptabler Vorteil“:

$$Q(A'') - Q(A') \geq DQ. \quad (\text{B.24})$$

Dabei gilt Folgendes:

- $DQ = \frac{1}{M-1}$ ,
- $M$  – die Anzahl der Alternativen,
- $A'$  – erstbeste Alternative hinsichtlich  $Q$ ,
- $A''$  – zweitbeste Alternative hinsichtlich  $Q$ .

**B2** „Akzeptable Entscheidungsstabilität“:

$A'$  muss auch als beste Alternative hinsichtlich  $S$  oder  $R$  bewertet werden.

Wenn eine von diesen zwei Bedingungen nicht erfüllt wird, werden folgende Kompromisslösungen vorgeschlagen:

- Alternativen  $A'$  und  $A''$ , wenn nur die Bedingung B2 nicht erfüllt ist.
- Alternativen  $A', A'', \dots, A^M$ , wenn nur die Bedingung B1 nicht erfüllt ist, wo  $A^M$  folgender Bedingung genügen muss:  $Q(A^M) - Q(A') \geq DQ$ .

## C Analytic Hierarchy Process

Der *Analytic Hierarchy Process* (AHP) wurde am Anfang der 70er Jahre von T.L. Saaty entwickelt. Die Methode wird ausführlich in [Saat08] beschrieben. Im Gegensatz zu allen anderen bisher in der vorliegenden Arbeit behandelten MCDM-Methoden ist AHP keine reine Methode für Alternativenbewertung, sondern eher ein Prozess für die multikriterielle Entscheidung. Dieser Prozess beinhaltet die Priorisierung der Kriterienwerte und die Bewertung der Alternativen. AHP bringt Ziele, Unterziele, Kriterien, Unterkriterien und Alternativen in eine hierarchische Struktur. Die Kriteriengewichte werden über paarweise Vergleiche aller Alternativen im Hinblick auf ihre Kriterien ermittelt. Die AHP-Methode wird oft für die Ermittlung der relativen Kriteriengewichte benutzt.

AHP sieht folgende Schritte vor:

### 1. *Darstellung des Problems in Form einer hierarchischen Struktur*

Das Entscheidungsproblem wird in logische Elemente wie Ziel, Unterziele, Kriterien und Subkriterien zerlegt. Diese Bestandteile werden in einer hierarchischen Struktur geordnet, die wie Abbildung 2.1 aussehen kann. Dabei lässt AHP mehrere Ebenen für Unterziele und Subkriterien zu.

### 2. *Bestimmung der Entscheidungsmatrizen*

Die Entscheidungsmatrizen werden durch einen paarweisen Vergleich der Elemente einer Ebene ermittelt. Dabei werden Entscheidungsmatrizen für jede Ebene hinsichtlich jeder verbundenen Komponente aus der nächsthöheren Ebene konstruiert. Für den Entscheidungsbaum in Abbildung 2.1 müssen nach der AHP-Methodologie folgende Matrizen gebildet werden:

- fünf Matrizen für die Ebene 3 für die Alternativen; eine Alternativen-Matrix im Hinblick auf jedes Kriterium aus der Ebene 2,
- drei Matrizen für die Ebene 2 für Kriterien; eine Kriterien-Matrix im Hinblick auf jedes zusammenhängende Unterziel aus der Ebene 1,
- eine Matrix für die Ebene 1 für die Ziele im Hinblick auf das Hauptziel aus der Ebene 0.

Dabei wird durch den paarweisen Vergleich bewertet, inwieweit ein Element ein anderes Element im Hinblick auf das zusammenhängende Element der nächsthöheren Ebene dominiert. Für die Bewertung wird eine spezielle Neun-Punkte-Skala von Saaty (siehe Tabelle C.1) benutzt.

| Skalenwert | Definition                  | Interpration  |
|------------|-----------------------------|---|
| 1          | gleiche Bedeutung           | Beide verglichene Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.                                    |
| 3          | etwas größere Bedeutung     | Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elementes im Vergleich zu einem anderen.     |
| 5          | erheblich größere Bedeutung | Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elementes im Vergleich zu einem anderen. |
| 7          | sehr viel größere Bedeutung | Die sehr viel größere Bedeutung eines Elementes hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.                             |
| 9          | absolut dominierend         | Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.                                    |
| 2, 4, 6, 8 | Zwischenwerte               | Zwischen zwei benachbarten Skalawerten muss ein Kompromiss getroffen werden.  |

Tabelle C.1: Neun-Punkte-Skala von Saaty für AHP für paarweisen Vergleich verschiedener Kriterien nach [ZiGu91]

Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine Reihe von quadratischen reziproken Matrizen, die aus Gewichten der verglichenen Elemente bestehen. Eine reziproke Matrix genügt der Bedingung aus Formel C.1. Für Formel (C.1) und für alle weiteren Formeln in diesem Abschnitt ist  $N$  die Anzahl der Matrixspalten. Da es bei AHP um quadratische Matrizen geht, ist  $N$  gleichzeitig auch die Anzahl von Matrixzeilen.

$$x_{ij} = \frac{1}{x_{ji}}, \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (\text{C.1})$$

Die AHP-Matrizen müssen auch der Konsistenzbedingung genügen. Bei einer konsistenten AHP-Matrix muss zum Beispiel folgendes gewährleistet sein: wenn ein Matrixelement  $x_1$  zweimal so groß wie  $x_2$  ist, und  $x_2$  zweimal so groß wie  $x_3$  ist, dann muss  $x_1$  viermal so groß wie  $x_3$  sein. Die Konsistenzbedingung lässt sich in Formel C.2 darstellen.

$$x_{ik}x_{kj} = x_{ij}, \quad 1 \leq i, j, k \leq N \quad (\text{C.2})$$

### 3. Kalkulation der Gewichtsvektoren

In diesem Schritt werden die Gewichtsvektoren für alle Matrizen berechnet. Ein Gewichtsvektor einer Matrix besteht aus den relativen Gewichten jeder Matrixzeile und damit aus jeder der Entscheidungsalternativen. Da es bei AHP um quadratische rezi-

proke Matrizen geht, kann das relative Gewicht jeder Matrixzeile  $i$  über die Elemente einer beliebigen Spalte  $j$  wie folgt berechnet werden:

$$w_i = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^N x_{ij}}, \quad i \in I. \quad (\text{C.3})$$

Belton und Gear haben bei der Ermittlung von Gewichtsvektoren nach (C.3) eine Schwäche entdeckt, die zur Inkonsistenz bei den Entscheidungsergebnissen führt. Aus diesem Grund wurde das *Revised AHP* (RAHP) vorgeschlagen, bei dem die Alternativenberechnung nicht relativ zu der Summe der Spaltenwerte, sondern relativ zu dem Maximum der Spaltenwerte nach Formel C.4 berechnet wird. Mehr dazu ist in [BeGe83] zu finden.

$$w_i = \frac{x_{ij}}{\max_{j \in J} x_{ij}}, \quad i \in I \quad (\text{C.4})$$

#### 4. Konsistenzüberprüfung

In diesem Schritt werden AHP-Matrizen auf Konsistenz überprüft. Konsistenz der Matrix wird anhand des Konsistenzwertes ( $KW$ ) bewertet. Wenn  $KW$  kleiner als 0,1 ist, gilt die Matrix als konsistent.  $KW$  wird mit Hilfe der Konsistenzindizes ( $KI$ ), des maximalen Eigenwertes  $\lambda_{\max}$  der Matrix und der Random Indizes ( $RI$ ) nach Formeln C.5 und (C.6) errechnet.  $RI$  für verschiedene Matrixgrößen wurde von T. Saaty ermittelt (siehe Tabelle C.2).

$$KI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (\text{C.5})$$

$$KW = \frac{KI}{RI_N} \quad (\text{C.6})$$

| N     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI(N) | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,48 | 1,56 | 1,57 | 1,59 |

Tabelle C.2: Tabelle der RI-Werte.  $N$  ist die Anzahl von Kriterien, was gleichzeitig die Anzahl der Matrixspalten ist.

#### 5. Bewertung der Alternativen

In diesem Schritt werden die Gewichte der Alternativen im Hinblick auf das Hauptziel berechnet. Im Schritt 3 wurden die Gewichte für alle Elemente jeder Schicht hinsichtlich aller Elementen der nächsthöheren Schicht errechnet. Der AHP-Baum in Abbildung 2.1 kann als ein gewichteter Graph betrachtet werden, bei dem jeder

Kante ein dazugehöriges Gewicht aus den im Schritt 3 berechneten Gewichtsvektoren zugeordnet wird.

Die Berechnung der Gewichte der Alternativen aus einer  $k$ . Ebene für den AHP-Baum aus Abbildung C.1 verläuft nach [ZiGu91] wie folgt:

$$w_z(x_i) = \sum_{j=1}^{m_{k-1}} w_{y_j}(x_i) w_z(y_j), \quad i \in I : 1 \leq i \leq m_k. \quad (C.7)$$

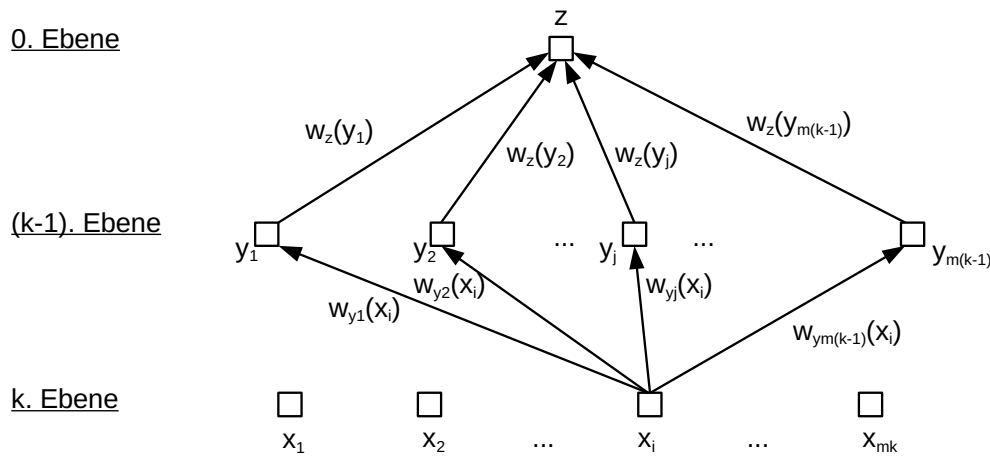


Abbildung C.1: AHP-Baum als gewichteter Graph nach [ZiGu91]

Für die AHP-Bäume mit mehr als drei Ebenen wird im ersten Schritt Formel (C.7) für die unteren drei Ebenen angewendet. Im zweiten Schritt wird der Graph bzw. der AHP-Baum umgebaut, indem die mittlere Ebene aus dem ersten Schritt aus dem Graph entfernt wird und die Elemente der oberen und unteren Ebenen verbunden werden. Die neu entstandenen Kanten bekommen die im ersten Schritt berechneten jeweiligen Gewichte. Dieses Prozedere wird solange wiederholt, bis nur die untere Alternativen-Ebene und die obere Hauptziel-Ebene übrig bleiben.

Eine Besonderheit von AHP besteht in der Handhabung der Kriterienwerte. Während bei allen anderen MCDM-Methoden die Kriterienwerte vorliegen müssen, lässt AHP die Bestimmung der Kriterienwerte durch den vom Entscheidungsfäller durchgeführten paarweisen Vergleich der Entscheidungsbaumkomponenten zu. Dadurch kann AHP ohne jegliche Messinstanz für die Kriterienwerte auskommen. Gleichzeitig bedeutet es, dass das Entscheidungsergebnis bei AHP viel mehr als bei anderen MCDM-Methoden vom Entscheidungsfäller abhängt. Demzufolge bedeutet das auch, dass der Entscheidungsfäller bei AHP im Vergleich zu den anderen MCDM-Methoden ein viel umfangreicheres Wissen über das zu bewertende Themengebiet mitbringen muss.



## Literaturverzeichnis

- [00916] ETSI TS 123 009. 3GPP TS 23.009: Digital cellular telecommunication system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Handover procedures. TS 123.009, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2016.
- [10711] ETSI TS 123 107. 3GPP TS 23.107: Quality of Service (QoS) concept and architecture (3GPP TS 23.107 version 10.1.0 Release 10). TS 23.107, 3rd Generation Partnership Project, 2011.
- [230014] ISO/IEC 23009-1. Information technology – Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH). Technischer Bericht, International Organization for Standardization (ISO), 2014.
- [3GPP11] 3GPP TS 26.171: Adaptive Multi-Rate – Wideband (AMR-WB) speech codec; General description. TS 123.009, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2011.
- [ADBD<sup>+</sup>99] Gregory D. Abowd, Anind K. Dey, Peter J. Brown, Nigel Davies, Mark Smith und Pete Steggles. Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, HUC '99, London, UK, UK, 1999. Springer-Verlag, S. 304–307.
- [AhBG14] A. Ahmed, L.M. Boulahia und D. Gaiti. Enabling Vertical Handover Decisions in Heterogeneous Wireless Networks: A State-of-the-Art and A Classification. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16(2), 2014, S. 776–811.
- [AhKL06] T. Ahmed, K. Kyamakya und M. Ludwig. A Context-Aware Vertical Handover Decision Algorithm for Multimode Mobile Terminals and Its Performance. In *IEEE/ACM Euro American Conference on Telematics and Information Systems, EATIS*, 2006.

- [AsWM14] A. Asadi, Q. Wang und V. Mancuso. A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 16(4), Fourthquarter 2014, S. 1801–1819.
- [BaLe07] F. Bari und V. Leung. Application of ELECTRE to Network Selection in A Heterogeneous Wireless Network Environment. In *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, März 2007, S. 3810–3815.
- [BBHJ<sup>+</sup>01] D. Baker, D. Bridges, R. Hunter, G. Johnson, J. Krupa, J. Murphy und K. Sorenson. Guidebook to Decision-making Methods. [https://www.researchgate.net/publication/255621095\\_Guidebook\\_to\\_Decision-Making\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/255621095_Guidebook_to_Decision-Making_Methods), U.S. Department of Energy, 2001. [Online: Stand 1.02.2017].
- [BeGe83] V. Belton und T. Gear. On a short-coming of Saaty’s method of analytic hierarchies. *Omega* Vol 11(3), 1983, S. 228–230.
- [BeSt02] V. Belton und T. Stewart. *Multiple Criteria Decision Analysis*,. Springer. 2002.
- [BhKV14] H. A. Bhute, P. P. Karde und Thakare V.M. Vertical Handover Decision Strategies in Heterogeneous Wireless Networks. *Conf. on Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing, ITC*, 2014.
- [BHSW07] R. Baumann, S. Heimlicher, M. Strasser und A. Weibel. A Survey on Routing Metrics. TIK report 262, ETH Zürich, Switzerland, Computer Engineering and Networks Laboratory, 2007.
- [BoHB08] J. Bonnin, Z.B. Hamouda und A. Belghith. Middleware for Multi-Interfaces Management Through Profiles Handling. *Mobilware’08, Innsbruck, Austria*, Februar 2008.
- [Brid22] P.W. Bridgman. *Dimensional Analysis*. New Haven, CT, U.S.A.: Yale University Press. 1922.
- [Bü13] P. Büschel. Entwicklung einer integrierten Software zur Ermittlung von Rechnernetz-Charakteristiken. Belegarbeit, Technische Universität Dresden, Fakultät für Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze, 2013.

- [CaDM04] A. Calvagna und G. Di Modica. A User-centric Analysis of Vertical Handovers. In *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Wireless Mobile Applications and Services on WLAN Hotspots, WMASH '04*, New York, NY, USA, 2004. ACM, S. 137–146.
- [ChHa83] V. Chankong und Y. Y. Haimes. *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*. New York, North Holland. 1983.
- [ChJa89] D. Chiu und R. Jain. Analysis of the Increase and Decrease Algorithms for Congestion Avoidance in Computer Networks. *Journal of Computer Networks and ISDN Band 17*, Juni 1989.
- [ChRBVK13] D. Cheelu, M. Rajasekhara Babu und P. Venkata Krishna. A Study of Vertical Handoff Decision Strategies in Heterogeneous Wireless Networks. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)* 5(3), Juni-Juli 2013.
- [Ever11] F. Evers. *Prädiktive Middleware-basierte Mobilitätsunterstützung für multikriterielle Handover*. Universitätsverlag Ilmenau. 2011.
- [Fish67] P.C. Fishburn. Additive Utilities with Incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments. *A Operations Research* 15(3), Juli 1967, S. pp. 537–542.
- [FLLJ14] Shuai Fu, Jie Li, Ruidong Li und Yusheng Ji. A Game Theory Based Vertical Handoff Scheme for Wireless Heterogeneous Networks. In *10th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)*, 2014, S. 220–227.
- [G11403] One-way transmission time. ITU-T G.114, International Telecommunication Union (ITU), 2003.
- [GeLe14] J. Geldermann und N. Lerche. Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Methode: PROMETHEE. *Georg-Augus-Universität Göttingen, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Professur für Produktion und Logistik.*, 2014.
- [GMPRSN09] J.R. Gallardo-Medina, U. Pineda-Rico und E. Stevens-Navarro. VI-KOR method for vertical handoff decision in beyond 3G wireless networks. In *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, (CCE), 2009 6th International Conference on*, 2009, S. 1–5.

- [HTTP17] HTTP Live Streaming Overview. <https://developer.apple.com/library/content/documentation/NetworkingInternet/Conceptual/StreamingMediaGuide/Introduction/Introduction.html>, Apple Inc., 2017. [Online; Stand 1. Februar 2017].
- [HuIm10] A. Huszak und S. Imre. Eliminating Rank Reversal Phenomenon in GRA-Based Network Selection Method. In *2010 IEEE International Conference on Communications*, Mai 2010, S. 1–6.
- [HwYo81] C.L. Hwang und K. Yoon. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer. 1. Auflage, 1981.
- [IEEE03] IEEE Std. 802.11g-2003, IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area networks, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Computer Society, 2003.
- [IEEE08] IEEE Std. 802.11r-2008, IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area networks, Specific requirements; Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications 1 Transition; Amendment 2: Fast Basic Service Set (BSS), IEEE Computer Society, 2008.
- [IEEE09a] IEEE Std. 802.11n-2009, IEEE Standard for Information technology, Local and metropolitan area networks, Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, IEEE Computer Society, Oktober 2009.
- [IEEE09b] IEEE Std. 802.16j-2009, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 1: Multihop Relay Specification, IEEE Computer Society, Juni 2009.
- [IEEE12] IEEE Std. 802.11TM-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007), Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Computer Society, 2012.

- [INET17a] INET for Mutiple-Criteria Handover. [https://github.com/eew2000/INET\\_For\\_MultipleCriteriaHandover](https://github.com/eew2000/INET_For_MultipleCriteriaHandover), 2017. [Online: Stand 22.02.2017].
- [INET17b] INET Framework. <https://inet.omnetpp.org/DocumentationGuidelines.html>, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [INET17c] INET Framework for OMNeT++, Manual. <https://omnetpp.org/doc/inet/api-current/inet-manual-draft.pdf>, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [IqSB86] M. A. Iqbal, J. H. Saltz und S. H. Bokhart. Performance tradeoffs in static and dynamic load balancing strategies. Technischer Bericht, NASA Langley Research Center; Hampton, VA, United States, März 1986.
- [ITU-11] Internet protocol data communication service - IP packet transfer and availability performance parameters. ITU-T Y.1540, International Telecommunication Union (ITU), 2011.
- [ITU-16] ITU-T. P.800.1: Methods for objective and subjective assessment of speech and video quality, Mean opinion score (MOS) terminology. ITU-T P.800.1, International Telecommunication Union (ITU), 2016.
- [JCYW<sup>+</sup>08] Wei-Wei Jiang, Hong-Yan Cui, Qiang-Jun Yan, Xiao-Juan Wang und Jian-Ya Chen. A novel application-oriented dynamic network selection in an integrated UMTS and WiMAX environment. In *2008 Third International Conference on Communications and Networking in China*, 2008, S. 158–161.
- [KaJe12] F.W. Karam und T. Jensen. Performance Analysis of Ranking for QoS Handover Algorithm for Selection of Access Network in Heterogeneous Wireless Networks. In *21st International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 2012, S. 1–6.
- [KaKP08] M. Kassar, B. Kervella und G. Pujolle. An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications* 31(10), 2008, S. 2607 – 2620.
- [LBHB08] I. Lassoued, J. M. Bonnin, Z. B. Hamouda und A. Belghith. A Methodology for Evaluating Vertical Handoff Decision Mechanisms. In *Seventh International Conference on Networking (icn 2008)*, April 2008, S. 377–384.

- [LiFY11] S. Liu, J. Forrest und Y. Yang. A brief introduction to grey systems theory. In *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*, September 2011, S. 1–9.
- [LiWL08] T. Lin, C. Wang und P. Lin. A Neural-network-based Context-aware Handoff Algorithm for Multimedia Computing. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.* 4(3), September 2008, S. 17:1–17:23.
- [MaMD16] D. Maroua, O. Mohammed und A. Driss. VIKOR for multi-criteria network selection in heterogeneous wireless networks. In *International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, Oktober 2016, S. 82–86.
- [MBCCM11] J. Márquez-Barja, C. T. Calafate, J. Cano und P. Manzoni. An overview of vertical handover techniques: Algorithms, protocols and tools. *Computer Communications* 34, 2011, S. 985–997.
- [MCMD09] *Multi-criteria analysis: a manual*. Department for Communities and Local Government: London, Department for Communities and Local Government, Eland House, Bressenden Place, London, SW1E 5DU. Januar 2009.
- [MiSt69] D.W. Miller und M.K. Starr. *Executive Decisions and Operations Research*. Englewood Cliffs, NJ, U.S.A.: Prentice-Hall, Inc. 1969.
- [MMPRSN10] J.D. Martínez-Morales, U. Pineda-Rico und E. Stevens-Navarro. Performance comparison between MADM algorithms for vertical handoff in 4G networks. *IEEE 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2010, S. 309–314.
- [MS-S16] Smooth Streaming Format SDK 1.0 Beta 2. <https://www.iis.net/downloads/microsoft/smooth-streaming-format-sdk>, Microsoft, 2016. [Online: Stand 1.02.2017].
- [NaHH06] N. Nasser, A. Hasswa und H. Hassanein. Handoffs in fourth generation heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine* 44(10), Oktober 2006, S. 96–103.
- [ns2217] The Network Simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].

- [ns3217] ns-3 Consortium. <https://www.nsnam.org/>, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [ns3M17] ns-3 Model Library. <https://www.nsnam.org/docs/models/html/>, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [NVAGD08] Q.-T. Nguyen-Vuong, N. Agoulmine und Y. Ghamri-Doudane. A user-centric and context-aware solution to interface management and access network selection in heterogeneous wireless environments. *Computer Networks* 52(18), 2008, S. 3358 – 3372.
- [NVGDA08] Q.-T. Nguyen-Vuong, Y. Ghamri-Doudane und N. Agoulmine. On utility models for access network selection in wireless heterogeneous networks. *IEEE Network Operations and Management Symposium*, 2008, S. 144–151.
- [OMNe15] Simulation Manual, OMNeT++, version 5.0. <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual>, OpenSim Ltd., 2015. [Online: Stand 1.02.2017].
- [OpTz07] S. Opricovic und G. Tzeng. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research* 178 Vol 178(2), April 2007, S. 514–529.
- [PAMM98] V. Paxson, G. Almes, J. Mahdavi und M. Mathis. Framework for IP Performance Metrics. RFC 2330, IETF, Mai 1998.
- [Plat10] Adobe Flash Platform. HTTP Dynamic Streaming on the Adobe Flash Platform. Enabling high-quality, network-efficient HTTP streaming for media delivery. [https://bugbase.adobe.com/index.cfm?event=file.view&id=2943064&seqNum=6&name=httpdynamicstreaming\\_wp\\_ue.pdf](https://bugbase.adobe.com/index.cfm?event=file.view&id=2943064&seqNum=6&name=httpdynamicstreaming_wp_ue.pdf), Adobe Systems Incorporated, 2010. [Online: Stand 1.02.2017].
- [Rand16] Class Random. <https://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/java/util/Random.html>, Oracle, 2016. [Online: Stand 1.02.2017].
- [rand17] RANDOM.ORG. [www.random.org](http://www.random.org), 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [rec:08] IEEE Std. 802.21TM-2008, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Media Independent Handover Services, IEEE Computer Society, Januar 2008.

- [Saat08] T.L. Saaty. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Sciences* 1(1), 2008.
- [Silk13] N. Silky Baghla. Performance Evaluation and Comparison of MADM Algorithms for Subjective and Objective Weights in Heterogeneous Networks. *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE)* Band Vol. 2, April 2013.
- [SKMa07] L. Skorin-Kapov und M. Matijasevic. A Data Specification Model for Multimedia QoS Negotiation. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Multimedia Communications*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2007, S. 27:1–27:7.
- [SKMa09] L. Skorin-Kapov und M. Matijasevic. A QoS negotiation and adaptation framework for multimedia services in NGN. In *ConTEL 2009, 10th International Conference on Telecommunications*, Juni 2009, S. 249–256.
- [Skyp16] How much bandwidth does Skype need? <https://support.skype.com/en/faq/FA1417-how-much-bandwidth-does-skype-need>, Skype and/or Microsoft, 2016. [Online: Stand 1.02.2017].
- [Skyp17] Media Quality and Network Connectivity Performance in Skype for Business Online. <https://support.office.com/en-us/article/Media-Quality-and-Network-Connectivity-Performance-in-Skype-for-Business-Online-5fe3e01b-34cf-44e0-b897-b0b2a83f0917>, Microsoft, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [SMSMH10] L. Sheng-Mei, P. Su und X. Ming-Hai. An improved TOPSIS vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks. In *2010 IEEE 12th International Conference on Communication Technology*, November 2010, S. 750–754.
- [SNMMPR12] E. Stevens-Navarro, J. D. Martinez-Morales und U. Pineda-Rico. Evaluation of Vertical Handoff Decision Algorithms Based on MADM Methods for Heterogeneous Wireless Networks. *Journal of applied research and technology* 10(4), 2012.
- [SNWo06] E. Stevens-Navarro und V.W.S. Wong. Comparison between Vertical Handoff Decision Algorithms for Heterogeneous Wireless Networks. In



- IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*, Band 2, 2006, S. 947–951.
- [SoJa04] Q. Song und A. Jamalipour. Quality of service provisioning in wireless LAN/UMTS integrated systems using analytic hierarchy process and Grey relational analysis. In *IEEE Global Telecommunications Conference Workshops, 2004. GlobeCom Workshops 2004.*, November 2004, S. 220–224.
- [SoJa05] Q. Song und A. Jamalipour. A Network Selection Mechanism for Next Generation Networks. *IEEE International Conference on Communications* Band 2, Mai 2005.
- [SzHa04] T. Szigeti und C. Hattingh. *End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs, and VPNs*. Cisco Press. 2004.
- [TaPS08] R. Tawil, G. Pujolle und O. Salazar. A Vertical Handoff Decision Scheme in Heterogeneous Wireless Systems. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2008, S. 119–124.
- [TrBo08] P.N. Tran und N. Boukhatem. Comparison of MADM decision algorithms for interface selection in heterogeneous wireless networks. *IEEE International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2008)*, 2008, S. 119–124.
- [TrSS98] E. Triantaphyllou, B. Shu und S. Nieto Sanchez. Multi-Criteria Decision Making: An Operations Research Approach. *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, (J.G. Webster, Ed.), John Wiley & Sons, New York Band 15, 1998, S. 175–186.
- [VaVT12] J.M. Valin, K. Vos und T. Terriberry. Definition of the Opus Audio Codec. Technischer Bericht, Internet Engineering Task Force (IETF), 2012.
- [VeAK04] H. Velayos, V. Aleo und G. Karlsson. Load balancing in overlapping wireless LAN cells. In *Communications, 2004 IEEE International Conference on*, Band 7, Juni 2004, S. 3833–3836.
- [VMMK11] K. Vasu, S. Maheshwari, S. Mahapatra und C.S. Kumar. QoS aware fuzzy rule based vertical handoff decision algorithm for wireless heterogeneous networks. In *National Conference on Communications (NCC)*, 2011, S. 1–5.

- [Wire17] Wireshark. <https://www.wireshark.org/>, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [YeDS17] Y. Yeryomin, M. Debes und J. Seitz. Framework for a Flexible Comprehensive Multiple-Criteria Network Selection for Mobile Heterogeneous Networks. *Journal of Telecommunications System & Management* (153), März 2017.
- [YeSe15] Y. Yeryomin und J. Seitz. Framework for Flexible Multi-Metric Path Selection for Next Generation Network. In *Journal of Advances in Computer Networks*, Band 3, März 2015.
- [YeSe16] Y. Yeryomin und J. Seitz. Enhanced multi-criteria-based path selection algorithm for heterogeneous networks. In *Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Juli 2016, S. 804–809.
- [YeSe17] Y. Yeryomin und J. Seitz. Application-Aware Optimization Approaches for Multiple-Criteria Network Selection in Mobile Heterogeneous Networks. In *2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, Juli 2017.
- [YoHw95] K. P. Yoon und C.L. Hwang. *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*. Sage Publications, Inc. 1. Auflage, 1995.
- [yout17] Live encoder settings, bitrates, and resolutions. <https://support.google.com/youtube/answer/2853702?hl=en>, Google, 2017. [Online: Stand 1.02.2017].
- [ZeBD10] M. Zekri, Jouaber B. und Zeghlache D. Context-Aware Vertical Handover Decision Making in Heterogeneous Wireless Networks. In *IEEE Local Computer Network Conference*, 2010.
- [ZiGu91] H. Zimmermann und L. Gutsche. *Multi-Criteria Analyse: Einführung In Die Theorie Der Entscheidungen Bei Mehrfachzielsetzungen*. Springer. 1991.

# Abbildungsverzeichnis

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.1  | Komponenten des MCDM-Prozesses . . . . .                                | 12  |
| 3.1  | Nutzer im modernen mobilen heterogenen Kommunikationsumfeld . .         | 26  |
| 4.1  | Nutzenfunktionen mit gesättigten Bereichen . . . . .                    | 43  |
| 4.2  | Nutzenfunktionen für Anwendungsfall I . . . . .                         | 46  |
| 4.3  | Nutzenfunktion für das Kriterium Bitrate . . . . .                      | 47  |
| 4.4  | Simulationsergebnisse für ORA-Modus und AORA-Modi . . . . .             | 58  |
| 5.1  | MCDM-Prozessschritte die Ableitung der Komponententypen . . . .         | 64  |
| 5.2  | EER-Modell der FLASHED-Datenbank . . . . .                              | 65  |
| 5.3  | Schematische Darstellung der FLASHED-Datenbank . . . . .                | 66  |
| 5.4  | Gesamtnutzwerte verschiedener MCDM-Methoden für Szenario I . . .        | 72  |
| 5.5  | Performanzkoeffizienten verschiedener MCDM-Methoden für Szenario II     | 72  |
| 5.6  | Gesamtnutzwerte verschiedener MCDM-Methoden für Szenario III . .        | 73  |
| 5.7  | Gesamtnutzwerte verschiedener MCDM-Methoden für Szenario IV . .         | 73  |
| 5.8  | Anwendungsspezifische Parametrierung der Ziele und der Kriterien . .    | 75  |
| 5.9  | MCDM-Algorithmen . . . . .  | 77  |
| 5.10 | FLASHED-Framework . . . . .   | 88  |
| 6.1  | Aufbau des Simulationsnetzes . . . . .                                  | 96  |
| 6.2  | Implementierungen in OMNeT++/INET . . . . .                             | 98  |
| 6.3  | Sammeln von Kriterienwerten in INET-Modulen . . . . .                   | 100 |
| 6.4  | Implementierung der Berechnung des Lastverteilungskoeffizienten . .     | 102 |
| 6.5  | Routine für die Anpassung von Anwendungsbitraten . . . . .              | 104 |
| 7.1  | Änderungen der Nutzwerte für das Szenario <i>LowBR_Single_STA</i> . . . | 121 |
| 7.2  | Änderungen der Nutzwerte für das Szenario <i>LowBR_Mult_STA</i> . . . . | 124 |
| 7.3  | Änderungen der Nutzwerte für das Szenario <i>HighBR_Mult_STA</i> . . .  | 127 |
| C.1  | AHP-Baum als gewichteter Graph nach [ZiGu91] . . . . .                  | 150 |



# Tabellenverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Entscheidungsmatrix . . . . .  | 9  |
| 2.2  | Entscheidungsmatrix für fünf Alternativen . . . . .                    | 9  |
| 2.3  | Variablen für die mathematische Auslegungen für diese Arbeit . . . .   | 11 |
| 2.4  | Klassifizierung der Kriterien . . . . .                                | 15 |
| 2.5  | Normierungstechniken . . . . .   | 17 |
| 2.6  | Klassifikationsschema für MCDM-Methoden nach [GeLe14] . . . . .        | 20 |
| 3.1  | Klassifizierung des Handovers nach [NaHH06] . . . . .                  | 24 |
| 3.2  | MCDM-basierte Handover-Entscheidungsalgorithmen . . . . .              | 30 |
| 3.3  | Bewertungsergebnisse für Anwendung der MCDM-Methoden . . . . .         | 32 |
| 3.4  | Kriterien für Handoverentscheidung für mobile Kommunikationsnetze      | 34 |
| 4.1  | Parametrierung der Kriterien . . . . .                                 | 41 |
| 4.2  | Entscheidungsmatrix mit Beispielkriterienwerten . . . . .              | 42 |
| 4.3  | Entscheidungsmatrix mit Beispielkriterienwerten . . . . .              | 42 |
| 4.4  | Parametrierung der Kriterien . . . . .                                 | 45 |
| 4.5  | Entscheidungsmatrix für Anwendungsfall I . . . . .                     | 46 |
| 4.6  | Entscheidungsmatrix für Anwendungsfall II . . . . .                    | 47 |
| 4.7  | Beispiel-Entscheidungsmatrix für AORA . . . . .                        | 52 |
| 4.8  | Beispiel-Entscheidungsmatrix für AORA . . . . .                        | 52 |
| 4.9  | Parametrierung der Kriterien für die Simulation . . . . .              | 54 |
| 4.10 | Durchschnittswerte der Kriterienwerte für verschiedene Simulationsmodi | 55 |
| 4.11 | Änderungen der Kriteriennutzwerte der besten Wege . . . . .            | 57 |
| 5.1  | Tabellenstruktur der FLASHED-Datenbank . . . . .                       | 67 |
| 5.2  | Alternativen und Kriterienkonfiguration . . . . .                      | 68 |
| 5.3  | Parametrierung der Kriterien . . . . .                                 | 71 |
| 5.4  | Parametrierung der Kriterien . . . . .                                 | 71 |
| 5.5  | Zusammensetzungsregeln für verschiedene Kriterienparameter . . . .     | 75 |
| 5.6  | Komponenten für die Fallstudie . . . . .                               | 78 |
| 5.7  | Tabelle <i>General</i> . . . . .                                       | 79 |
| 5.8  | Tabelle <i>User</i> . . . . .  | 79 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.9  | Tabelle <i>Perspective</i> . . . . .                                 | 80  |
| 5.10 | Tabelle <i>Goal</i> . . . . .  | 80  |
| 5.11 | Tabelle <i>Criterion_basic</i> . . . . .                             | 80  |
| 5.12 | Tabelle <i>Criterion_specific</i> . . . . .                          | 81  |
| 5.13 | Tabelle <i>Algorithm</i> . . . . .                                   | 82  |
| 5.14 | Tabelle <i>Algorithm_and_goal</i> . . . . .                          | 82  |
| 5.15 | Tabelle <i>Application_type</i> . . . . .                            | 83  |
| 5.16 | Tabelle <i>Application</i> . . . . .                                 | 83  |
| 5.17 | Tabelle <i>Goal_per_app</i> . . . . .                                | 84  |
| 5.18 | Tabelle <i>Criterion_specific_per_app</i> . . . . .                  | 85  |
| 5.19 | Richtwerte für <i>Skype for Business client</i> . . . . .            | 86  |
| 5.20 | Beispieleingangsdaten . . . . .                                      | 86  |
| 5.21 | Zusammensetzung von anwendungsspezifischen Parameterwerte . . . . .  | 87  |
| 6.1  | Implementierte Statistikfunktionen . . . . .                         | 106 |
| 7.1  | Parameterwerte der simulierten Kommunikationsumgebung . . . . .      | 112 |
| 7.2  | Parametrierung der Bewegungsmuster . . . . .                         | 112 |
| 7.3  | Szenarien für die Simulationen . . . . .                             | 113 |
| 7.4  | Modi für die Simulationen . . . . .                                  | 113 |
| 7.5  | Kosten und maximale Bitraten für APs . . . . .                       | 114 |
| 7.6  | Priorisierung der Perspektiven und Ziele pro Modus . . . . .         | 114 |
| 7.7  | Konfiguration der gesättigten Bereiche . . . . .                     | 115 |
| 7.8  | Parametrierung der Kriterien . . . . .                               | 116 |
| 7.9  | Parametrierung der Kriterien . . . . .                               | 116 |
| 7.10 | Simulationsergebnisse für Szenario <i>LowBR_Single_STA</i> . . . . . | 120 |
| 7.11 | Simulationsergebnisse für Szenario <i>LowBR_Mult_STA</i> . . . . .   | 123 |
| 7.12 | Simulationsergebnisse für Szenario <i>HighBR_Mult_STA</i> . . . . .  | 126 |
| A.1  | Gesamtnutzwerte für Szenario I . . . . .                             | 137 |
| A.2  | Gesamtnutzwerte für Szenario II . . . . .                            | 138 |
| A.3  | Gesamtnutzwerte für Szenario III . . . . .                           | 138 |
| A.4  | Gesamtnutzwerte für Szenario IV . . . . .                            | 139 |
| C.1  | Neun-Punkte-Skala für AHP . . . . .                                  | 148 |
| C.2  | Tabelle der RI-Werte . . . . .                                       | 149 |

# Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

|                  |  |
|------------------|--|
| 3GPP .....       | <b>3</b> rd <b>G</b> eneration <b>P</b> artnership <b>P</b> roject   |
| 3GPP TS .....    | <b>3</b> rd <b>G</b> eneration <b>P</b> artnership <b>P</b> roject <b>T</b> echnical <b>S</b> pecification |
| AHP .....        | <b>A</b> lytic <b>H</b> ierarchy <b>P</b> rocess   |
| Anw.-Bitrate ... | <b>A</b> nwe <b>d</b> ungs <b>b</b> itrate   |
| AORA .....       | <b>A</b> ggressive <b>O</b> versaturation <b>R</b> eduction <b>A</b> lgorithm                              |
| AP .....         | <b>A</b> ccess <b>P</b> oint   |
| BER .....        | <b>B</b> it <b>E</b> rror <b>R</b> ate   |
| bit/s .....      | <b>B</b> it pro <b>S</b> ekunde  |
| BS .....         | <b>B</b> ase <b>S</b> tation   |
| C/MByte .....    | <b>C</b> ent pro <b>M</b> egabyte  |
| C/min .....      | <b>C</b> ent pro <b>M</b> inute  |
| CLI .....        | <b>C</b> ommand <b>L</b> ine <b>I</b> nterface   |
| D2D .....        | <b>D</b> evice- <b>t</b> o- <b>D</b> evice   |
| dB .....         | <b>D</b> ezibel  |
| dBm .....        | <b>D</b> ezibel <b>M</b> illiwatt  |
| EER .....        | <b>E</b> nhanced <b>E</b> ntity- <b>R</b> elationship <b>M</b> odel  |
| ELECTRE ....     | <b>E</b> Limination and <b>C</b> hoice <b>E</b> xpressing <b>R</b> Eality                                  |
| FLASHED ....     | <b>F</b> Lexible <b>A</b> pplication- <b>S</b> ensitive <b>H</b> andover <b>D</b> ecision                  |
| FLOPS .....      | <b>F</b> loating <b>P</b> oint <b>O</b> perations <b>P</b> er <b>S</b> econd                               |
| GRA .....        | <b>G</b> rey <b>R</b> elational <b>A</b> nalysis   |
| GRC .....        | <b>G</b> ray <b>R</b> elational <b>C</b> oefficient  |
| GRG .....        | <b>G</b> ray <b>R</b> elational <b>G</b> rade  |
| GSM .....        | <b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile <b>C</b> ommunications                                    |
| GUI .....        | <b>G</b> raphical <b>U</b> ser <b>I</b> nterface   |
| HO .....         | <b>H</b> andover   |
| HO-Anzahl ....   | <b>H</b> andover- <b>A</b> nzahl   |
| HTTP .....       | <b>H</b> ypertext <b>T</b> ransfer <b>P</b> rotocol  |
| IEEE .....       | <b>I</b> nstitute of <b>E</b> lectrical and <b>E</b> lectronics <b>E</b> ngineers                          |
| IETF .....       | <b>I</b> nternet <b>E</b> ngineering <b>T</b> ask <b>F</b> orce  |

|                |   |
|----------------|---|
| IP .....       | <b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol   |
| ISO .....      | <b>I</b> nternational <b>O</b> rganization for <b>S</b> tandardization  |
| ITU .....      | <b>I</b> nternational <b>T</b> elecommunication <b>U</b> nion   |
| JAR .....      | <b>J</b> ava <b>A</b> rchive  |
| kbit/s .....   | <b>K</b> ilobit pro sekunde   |
| LAN .....      | <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork  |
| LBA .....      | <b>L</b> oad <b>B</b> alancing <b>A</b> lgorithm  |
| LTE .....      | <b>L</b> ong <b>T</b> erm <b>E</b> volution   |
| LTE-A .....    | <b>L</b> ong <b>T</b> erm <b>E</b> volution- <b>A</b> dvanced   |
| LV-Index ..... | <b>L</b> astverteilungs <b>i</b> ndex   |
| m .....        | <b>M</b> eter   |
| m/s .....      | <b>M</b> illisekunden   |
| MAC .....      | <b>M</b> edia <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol  |
| MADM .....     | <b>M</b> ultiple- <b>A</b> tttribute <b>D</b> ecision <b>M</b> aking  |
| MAUT .....     | <b>M</b> ulti- <b>A</b> tttribute <b>U</b> tility <b>T</b> heory  |
| MCDA .....     | <b>M</b> ultiple- <b>C</b> riteria <b>D</b> ecision <b>A</b> nalysis  |
| MCDM .....     | <b>M</b> ultiple- <b>C</b> riteria <b>D</b> ecision <b>M</b> aking  |
| MEW .....      | <b>M</b> ultiplicative <b>E</b> xponential <b>W</b> eighting  |
| MIH .....      | <b>M</b> edia <b>I</b> ndependent <b>H</b> andover  |
| MIHF .....     | <b>M</b> edia <b>I</b> ndependent <b>H</b> andover <b>F</b> unction   |
| MODM .....     | <b>M</b> ultiple- <b>O</b> bjective <b>D</b> ecision <b>M</b> aking   |
| MS .....       | <b>M</b> obile <b>S</b> tation  |
| ms .....       | <b>M</b> illisekunde  |
| mW .....       | <b>M</b> illiwatt   |
| NGN .....      | <b>N</b> ext <b>G</b> eneration <b>N</b> etwork   |
| ns2 .....      | <b>N</b> etwork <b>S</b> imulator 2   |
| ns3 .....      | <b>N</b> etwork <b>S</b> imulator 3   |
| OMNeT++ ....   | <b>O</b> bjective <b>M</b> odular <b>N</b> etwork <b>T</b> estbed in C++  |
| ORA .....      | <b>O</b> versaturation <b>R</b> eduction <b>A</b> lgorithm  |
| OSI .....      | <b>O</b> pen <b>S</b> ystems <b>I</b> nterconnection  |
| PC .....       | <b>P</b> erformance <b>C</b> oefficient   |
| PoA .....      | <b>P</b> oint of <b>A</b> ttachment   |
| PROMETEE ..    | <b>P</b> reference <b>R</b> anking <b>O</b> rganization <b>M</b> ETHod for <b>E</b> nrichment of<br>Evaluations |
| PV .....       | <b>P</b> aketverlustrate  |
| QoS .....      | <b>Q</b> uality of <b>S</b> ervice  |
| RFC .....      | <b>R</b> equest for <b>C</b> omments  |
| RSS .....      | <b>R</b> eceived <b>S</b> ignal <b>S</b> trength  |



|                 |   |
|-----------------|---|
| s .....         | <b>S</b> ekunde   |
| SAW .....       | <b>S</b> imple <b>A</b> dditive <b>W</b> eighting   |
| SINR .....      | <b>S</b> ignal-to- <b>I</b> nterference-plus- <b>N</b> oise <b>R</b> atio                               |
| SNR .....       | <b>S</b> ignal-to- <b>N</b> oise <b>R</b> atio  |
| STA .....       | <b>M</b> obile <b>S</b> tation  |
| TOPSIS .....    | <b>T</b> echnique for <b>O</b> rders Preference by <b>S</b> imilarity to <b>I</b> deal <b>S</b> olution |
| UMTS .....      | <b>U</b> niversal <b>M</b> obile <b>T</b> elecommunications <b>S</b> ystem                              |
| VBR .....       | verfügbare <b>B</b> itrate  |
| Verz. ....      | <b>V</b> erzögerung   |
| VIKOR .....     | Serbisch: <b>V</b> Ise <b>K</b> riterijumska <b>O</b> ptimizacija I <b>K</b> ompromisno <b>R</b> esenje |
| VoIP .....      | <b>V</b> oice over <b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol  |
| WiMAX .....     | <b>W</b> orldwide <b>I</b> nteroperability for <b>M</b> icrowave <b>A</b> ccess                         |
| WLAN .....      | <b>W</b> ireless <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork   |
| WLAN AP ....    | <b>W</b> ireless <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork <b>A</b> ccess <b>P</b> oint                |
| WPM .....       | <b>W</b> eighted <b>P</b> roduct <b>M</b> odel  |
| WSM .....       | <b>W</b> eighted <b>S</b> um <b>M</b> odel  |
| XML .....       | <b>E</b> xtensible <b>M</b> arkup <b>L</b> anguage  |
| Übersch.-Koeff. | <b>Ü</b> berschuss- <b>K</b> oeffizient   |